



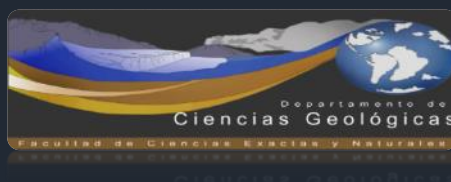
TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Caracterización tecnológica de las arenas silíceas como insumo mineral en la industria hidrocarburífera: problemáticas y aprovechamiento para la reducción de costos. Evaluación de Proyecto para la instalación de un laboratorio de análisis y control de materias primas.

Autora: Lic. María Florencia Partearroyo

Directora: Dra. Liliana N. Castro
Codirector: Esp. Silvio Gascón

2019





TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Caracterización tecnológica de las arenas silíceas como insumo mineral en la industria hidrocarburífera: problemáticas y aprovechamiento para la reducción de costos. Evaluación de Proyecto para la instalación de un laboratorio de análisis y control de materias primas.

Autora: Lic. María Florencia Partearroyo

Directora: Dra. Liliana N. Castro
Codirector: Esp. Silvio Gascón

2019



Resumen: El análisis de las características de los minerales de aplicación resulta clave a la hora de decidir el uso de determinadas materias primas en los procesos industriales de diferente índole. La implementación de materias primas de inadecuada calidad ocasiona cuantiosos gastos en los procesos, generando pérdidas para las empresas. En la industria petrolera de yacimientos no convencionales, actualmente en auge, uno de los procesos más costosos es la fracturación hidráulica, donde son empleados miles de toneladas de arenas silíceas como agentes de sostén de las fracturas.

Este trabajo integrador permite conocer las características de las arenas silíceas, usos, depósitos en la Argentina, producción, mercado nacional y mundial, así como también su función y especificaciones técnicas exigidas por la industria hidrocarburífera para su aplicación como agentes de sostén.

Se evalúa además la instalación de un laboratorio de servicios geológicos que realice ensayos enfocados a analizar y controlar la calidad de las arenas empleadas en las operaciones de fracturación. La ubicación del mismo en la localidad de Bahía Blanca lo convierte en un proyecto viable ya que se trata de un punto estratégico y uno de los principales nodos en la logística de insumos y servicios para la creciente industria de hidrocarburos no convencionales de la Formación Vaca Muerta. Se pone en discusión la importancia de realizar estudios de caracterización tecnológica de las materias primas siguiendo las normas y prácticas recomendadas existentes para la industria, de modo de obtener resultados confiables sobre las materias primas a emplear evitando y reduciendo gastos innecesarios en las industrias en general.

Abstract: Industrial minerals characteristics analysis is relevant when deciding the use of certain raw materials at different industrial processes. The application of low quality materials causes more expensive processes generating losses on the company's economy. At non-conventional oil industry, hydraulic fracturing is the most expensive process which consumes thousands of tons of siliceous sand as proppant.

This report describes the characteristics and uses of siliceous sands, the main Argentinian deposits, national and international production and markets, as well as the requirements of the oil industry for their use as proppants on fracking processes.

Installation of a geological services laboratory is also evaluated, focused on quality control analysis of the sands required for hydraulic fracturing operations. Its location at Bahía Blanca makes it a viable project because it is a strategic point and one of the main nodes for the non-conventional logistic of Vaca Muerta Formation. It is also discussed the importance of carrying out technological characterization studies on industrial minerals, according to the existing industry procedures, standards and recommended practices, obtaining reliable results which can be useful for choosing the correct raw material, avoiding or reducing unnecessary expenses on industrial processes.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. OBJETIVOS	
2.1. Objetivos generales.....	5
2.2. Objetivos específicos	5
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
4. DESARROLLO DE LA TEMÁTICA: ARENAS, COMO MATERIA PRIMA INDUSTRIAL	
4.1. Arenas silíceas	
4.1.a. <i>Generalidades.....</i>	<i>7</i>
4.1.b. <i>Usos.....</i>	<i>9</i>
4.1.c. <i>Sustitutos.....</i>	<i>14</i>
4.1.d. <i>Características de los depósitos en la Argentina.....</i>	<i>14</i>
-Yacimiento de arenas silíceas en la Provincia de Entre Ríos.....	15
-Yacimiento de Diamante	
-Yacimiento de Ibicuy	
-Yacimiento del Río Jarilla, Provincia de San Luis.....	19
-Yacimientos en Dolavon, Provincia de Chubut.....	20
-Depósitos de la Provincia de Jujuy.....	20
4.1.e. <i>Marco Legal.....</i>	<i>22</i>
4.1.f. <i>Producción nacional.....</i>	<i>23</i>
4.1.g. <i>Mercado: características y dimensiones.....</i>	<i>26</i>
-Escenario mundial.....	27
-Escenario nacional.....	30
4.2. Arena para la industria petrolera	
4.2.a. <i>Generalidades.....</i>	<i>35</i>
4.2.b. <i>Yacimientos No Convencionales en la Argentina.....</i>	<i>36</i>
4.2.c. <i>Proceso de fracturación e importancia de las arenas.....</i>	<i>40</i>
4.2.d. <i>Agentes de sostén.....</i>	<i>43</i>
4.2.e. <i>Características y especificaciones técnicas de las arenas de fracturación.....</i>	<i>46</i>
4.2.f. <i>Normativas y certificaciones.....</i>	<i>48</i>

4.2.g. Especificaciones técnicas:	
a) Granulometría.....	49
b) Forma de las partículas.....	50
c) Densidad.....	51
d) Resistencia a la rotura.....	51
e) Contenido de arcillas e inorgánicos.....	52
f) Resistencia a los ácidos.....	52
4.2.h. Análisis, ensayos y equipamiento	
a) Tamizado.....	53
b) Esfericidad y redondez.....	55
c) Densidad <i>bulk</i> , densidad aparente y absoluta.....	56
d) Resistencia a la rotura.....	56
e) Turbidez.....	57
f) Solubilidad en ácido.....	58
g) Muestreo.....	58
4.2.i. Mercado, demanda de la materia prima y centros de consumo.....	60
5. PROPUESTA DE INSTALACIÓN DE UN LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIA PRIMA PARA LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y OTRAS. EVALUACIÓN DE PROYECTO	
5.1. Generalidades y objetivos del proyecto.....	63
5.2. Ubicación.....	64
5.3. Servicios.....	64
5.4. Mercado para la prestación de servicios.....	65
5.5. Viabilidad	
a) Justificación del proyecto.....	66
b) Inversión requerida	67
c) Tiempo de recuperación de la inversión.....	69
d) Vida útil del proyecto.....	71
5.6. Otras consideraciones y recomendaciones	
5.6.a. Certificaciones, acreditaciones y habilitaciones.....	71
5.6.b. Higiene y seguridad en el ambiente laboral.....	72
5.7. Discusión.....	73
6. BIBLIOGRAFÍA.....	75
ANEXO 1.....	79
ANEXO 2.....	80

1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de las problemáticas con las que deben lidiar hoy en día las empresas que consumen minerales como materia prima, radica en la falta de conocimiento de propiedades sencillas como por ejemplo la distribución granulométrica de los materiales. Dicha falencia suele estar dada por la inexistencia de lugares certificados para realizar estos ensayos, o por la poca seriedad que se toma a la hora de analizar la distribución y selección de tamaños de las partículas, ensayos que muchas veces suele hacerse de forma artesanal sin respetar los protocolos.

La industria minera, por ejemplo, involucra como etapa inicial en el procesamiento de minerales, a la trituración y/o molienda. Estos procesos suelen ser claves a la hora de lograr el tamaño y el grado de exposición o liberación óptimo de las partículas, para que las mismas sean adecuadamente transportadas, mezcladas e incluso faciliten reacciones químicas. Por ejemplo, un inadecuado grado de liberación de éstas puede ocasionar problemas serios en la industria minera metalífera, relacionados con el porcentaje de recuperación de metales y gastos innecesarios en el consumo de reactivos.

Otro de los ejemplos a citar y afines con actividades actualmente en auge, son aquellos relacionados con la industria petrolera. La explotación de reservorios no convencionales ha llevado a la necesidad de realizar procesos de fracturación hidráulica (*fracking*), con el fin de generar permeabilidad secundaria en rocas generadoras y portadoras de hidrocarburos residuales. Dicho proceso involucra el consumo de arenas con características específicas, inyectadas a presión en la formación rocosa mediante un fluido, con el fin no sólo de fracturar, sino también de sostener o mantener la apertura de la misma y generar la permeabilidad adecuada para que el hidrocarburo allí alojado, pueda fluir y ser extraído. Como es de esperar, este mineral de aplicación no sólo debe contar con características composicionales específicas, sino también con propiedades de redondez, esfericidad y de tamaños o distribuciones granulométricas apropiadas.

Sin ir más lejos, los trabajos geotécnicos, deben involucrar los análisis granulométricos de los suelos sobre los cuales van a realizarse los cimientos de las diferentes obras ingenieriles. Esto, resulta de vital importancia ya que determinará la forma de emplazamiento, los tipos y las cantidades de materiales de construcción a emplearse y, lo más crucial, el éxito o no de dicha obra.

Un ensayo granulométrico es un análisis relativamente simple que busca determinar en forma relativa, las cantidades de cada uno de los tamaños de grano que componen una muestra, ya sea de sedimento o de roca. Si bien, el tamaño no es la única propiedad evaluada para determinar las aptitudes de una materia prima, es una de las más importantes a considerar teniendo en cuenta los ejemplos anteriormente citados.

Tal como ya ha sido mencionado, los servicios prestados o laboratorios encargados de realizar dichos ensayos suelen hacerlo de forma casera o sin certificaciones, ocasionando muchas veces, serios problemas de índole económica a las diversas industrias. Es por ello, que en el presente trabajo de investigación se realizará una evaluación de proyecto relacionada con la instalación de un laboratorio, con la capacidad de brindar servicios geológicos, que involucren la ejecución de ensayos sedimentológicos (granulométricos, mineralógicos) y otros necesarios vinculados a la especificación técnica para diferentes industrias.

La ubicación en la que se plantea instalar este laboratorio es en la zona de Bahía Blanca. Esta ciudad juega un rol importantísimo desde el punto de vista logístico, ya que se ha convertido en un nodo estratégico para el ingreso tanto de equipos como de insumos para los proyectos petroleros no convencionales de Vaca Muerta. Es por ello, que se enfocará en la posibilidad de captar al mercado de la industria petrolera, específicamente relacionado con el consumo de arena para fracturación (*fracking*).

2. OBJETIVOS

El objetivo final del presente trabajo consiste en la evaluación de la puesta en marcha de un laboratorio con capacidad de realizar ensayos y prestar servicios a diversas industrias. Si bien estará enfocado en los ensayos de tipo sedimentológicos (granulométricos, mineralógicos) se evaluará también la posibilidad de adicionar otro tipo de análisis afines como ensayos de carga (resistencia a la compresión, resistencia a la fractura), determinación de la redondez y esfericidad) y otros ensayos químicos como, determinación de carbonatos por pérdida por ataque ácido, pérdida de peso por solubilidad, entre otros.

Dado que se pretende realizar un trabajo de tipo integrador, capaz de relacionar los conocimientos logrados a partir de las diversas materias cursadas en la Carrera de Especialización de Geología Minera, se mencionan a continuación una serie de objetivos generales que permitirán realizar una evaluación final de dicho proyecto.

2.1. Objetivos generales

- a. Describir el mineral cuyo mercado se investiga.
- b. Recopilar y analizar la información empleada con sus citas.
- c. Indicar la estructura de la demanda. Destino del mineral (consumo o materia prima para otras industrias o participar de ambas condiciones).
- d. Indicar la oferta interna y externa, considerando origen y aptitud respecto a las especificaciones requeridas por cada industria.
- e. Investigar sobre los correctos procedimientos a seguir para realizar los ensayos de calidad del mineral de estudio.
- f. Investigar sobre los equipos necesarios para llevarlos a cabo en forma adecuada, así como también las normas de seguridad y calidad correspondientes, y las certificaciones y/o habilitaciones requeridas.
- g. Mostrar los tipos ensayos sedimentológicos, ensayos de carga y otros ensayos químicos que deberían tenerse en cuenta.
- h. Presentar las recomendaciones sobre sistema de calidad, procedimientos y seguridad de laboratorios.

2.2. Objetivos específicos

- a. Analizar las características y especificaciones técnicas de las arenas en particular para arenas de fracturación (procesos de *fracking*).
- b. Investigar sobre la existencia y disponibilidad de depósitos en nuestro país y características de cada uno de ellos.
- c. Indicar la oferta interna y externa en función de las especificaciones requeridas y los volúmenes demandados por la industria petrolera.

- d. Mostrar la relación entre depósitos posibles y centros de consumo.
- e. Enumerar los análisis, ensayos y/o certificaciones requeridos por la industria analizada.
- f. Investigar sobre la existencia de laboratorios habilitados que brinden servicios a estas industrias u otras de diversa índole, en la región.
- g. Evaluar la viabilidad (relación costo-beneficio) de montar un laboratorio propio, para brindar los servicios planteados con valores competitivos.

De este modo el Trabajo Final Integrador, logrará relacionar conocimientos obtenidos en las áreas de Minerales Industriales, Yacimientos Argentinos, Métodos de Aplicación Yacimientológica, Explotación de Yacimientos y Tratamientos Mineralúrgicos, Aspectos Legales, Evaluación y Gerenciamiento de Proyectos Mineros y Calidad, Ambiente, Salud y Seguridad.

El presente trabajo tendrá además un último objetivo específico: evaluar la posibilidad de brindar servicios que involucren minerales de aplicación y análisis relacionados, pero con aplicación en otras industrias que no sean necesariamente mineras.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo integrador está basado en tareas de búsqueda y recopilación bibliográfica, investigación, análisis y consulta a empresas relacionadas con los temas a tratar.

Siguiendo el orden de los objetivos previamente descriptos, el trabajo se inicia con una recopilación bibliográfica, revisión de información relacionada con las arenas como mineral de aplicación y análisis y consulta a empresas relacionadas con los temas a tratar. Se investigó sobre la existencia de yacimientos en nuestro país, la ubicación y características, oferta y demanda de dicho mineral, entre otras.

Con relación a su aplicación en la industria petrolera, en primera instancia se hizo una breve revisión de los procesos de *fracking*, características e insumos requeridos, así como las características y certificaciones que las mismas exigen. Se analizó la oferta interna y externa, considerando origen, aptitud respecto a las especificaciones requeridas por la industria, así como las características y certificaciones que la misma exige.

Por otro lado, se especifican los tipos de ensayos que se pueden ofrecer, qué certificaciones son requeridas y qué laboratorios actualmente ya los realizan. Se complementó con una consulta de mercado sobre los prestadores de servicios geológicos disponibles, la demanda de equipamiento que generan estos prestadores y sobre los proveedores de los equipos disponibles para realizar los ensayos postulados.

Finalmente, se esquematiza una evaluación de costos implicados y la viabilidad de llevar a cabo el proyecto de laboratorio con tales fines.

4. DESARROLLO DE LA TEMÁTICA: ARENAS, COMO MATERIA PRIMA INDUSTRIAL

4.1 Arenas silíceas

4.1.a. Generalidades

Desde el punto de vista sedimentológico, las arenas, en conjunto con las areniscas, conforman alrededor del 30% de la cobertura sedimentaria de nuestro planeta (Selley, 2000). Por definición, las arenas constituyen depósitos de tipo clástico o detrítico, cuya granulometría varía entre los 0,0625 y los 0,2 milímetros (Fig. 1). Así mismo, es posible clasificarlas como arenas finas, cuando el tamaño de grano varía entre 0,06mm y 0,2mm; arenas medias, entre 0,2mm y 0,6mm; y finalmente como arenas gruesas a aquellas cuyas dimensiones se encuentran entre los 0,6mm y los 2,0mm.

Autores como Smith y Collis (2001), definen a las arenas, en conjunto con las gravas, como acumulaciones de fragmentos de rocas o granos minerales liberados de diversas rocas madres a partir de procesos de meteorización y que han sido posteriormente transportados, desgastados y seleccionados por agentes erosivos, tales como el agua y el viento. Dichos agentes son los encargados de eliminar durante el transporte a todos aquellos fragmentos minerales más frágiles, obteniendo como resultado un agregado mineral relativamente más resistente que el material o roca que le dio origen.

A pesar de que existe una gran variedad de arenas, en lo que respecta a su composición, el presente trabajo se centrará únicamente en las **arenas** de tipo **silíceas**, también denominadas **cuarcíferas o industriales**. Tal como su nombre lo indica, se encuentran formadas por un porcentaje de granos de cuarzo generalmente superior al 90%, aunque algunos autores proponen porcentajes mayores al 95% o 98%. En la Tabla 1 se presentan algunas características químicas generales, extraídas de la Publicación Técnica N°4 del SEGEMAR-IGRM (1999).

Tabla 1. Características químicas de las arenas silíceas. Fuente: Publicación Técnica N°4 SEGEMAR-IGRM (1999).

SiO₂	> 90%
Al₂O₃	< 4%
SiO₂/ Al₂O₃	> 40%
Fe₂O₃	< 1%
FeO	< 4%
Na₂O	Muy escaso, generalmente < 0,2%
K₂O	Muy escaso, generalmente <0,2%
CaO + MgO	Muy variable, pudiéndose incrementar con cementos carbonáticos

Para lograr dicha composición, es importante alcanzar un alto grado de madurez no sólo mineralógica, sino también textural. La madurez composicional se expresa como la relación entre el total de granos de cuarzo + chert frente a feldespatos + fragmentos de roca. Es un índice útil para comparar distintos tipos de arenas. Una arena inmadura presenta muchos fragmentos líticos y feldespato mientras que una arena madura tiene algo de feldespato y mucho cuarzo. La madurez textural, está relacionada al contenido en material fino, al grado de

redondez de los clastos y dispersión de los tamaños de grano del sedimento. Sedimentos inmaduros texturalmente son aquellos que tienen más del 5% de matriz fina, los cantos están poco redondeados y la dispersión de los tamaños de grano es elevada (coeficiente alto). La madurez textural y la composicional están muy relacionadas y pueden indicar el grado de transporte y también el posible reciclado de los clastos. Teniendo en cuenta que el cuarzo es uno de los minerales más estables, lograr un alto porcentaje del mismo en las arenas, implica no solamente que la fuente sea rica en dicho mineral, sino que además sea afectada por procesos de meteorización principalmente físicos, durante largos períodos de tiempo (González *et al*, 2004). Varios autores coinciden que para lograr depósitos de este tipo se requerirá al menos, de dos o más ciclos de retrabajo de los sedimentos.

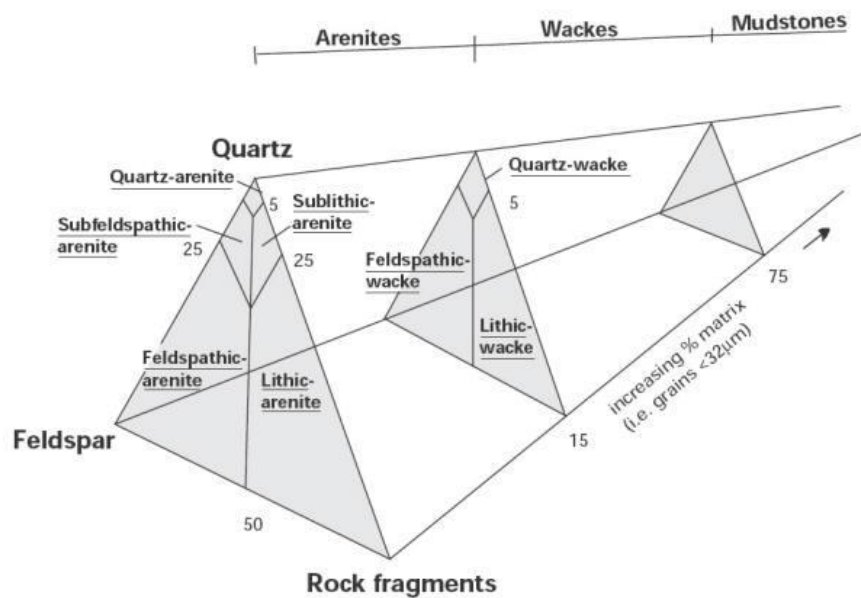


Figura 1. Clasificación de las rocas sedimentarias detríticas en función de la naturaleza y tamaño de los clastos. Extraído de Dott (1984) modificado por Pettijohn (1987).

En lo que a explotación respecta, al tratarse de depósitos sedimentarios y, en general de material deleznable, el tipo de explotación más común es el minado hidráulico a cielo abierto, donde suele extraerse el material con equipos como dragas y bombas, ya que el nivel freático suele ser somero (Ramírez R., 2007). En este tipo de extracción no son requeridos procesos de molienda, pero si suelen llevarse a cabo métodos de eliminación de minerales o impurezas, como por ejemplo de arcillas. Otro método de minado en los yacimientos de arenas silíceas es en seco y sin explosivos, donde son empleados directamente equipos de excavación para la extracción de los sedimentos, acarreo y almacenamiento. En este caso en particular, suele realizarse un primer paso de liberación de los granos, como puede ser una molienda, para lograr separar los minerales de interés de aquellos que son contaminantes.

Si bien los métodos de explotación de estas arenas pueden ser relativamente sencillos, a veces se requiere de procesos posteriores de beneficio del mineral, para lograr la pureza acorde a la aplicación que se le vaya a dar.

4.1.b. Usos

Las arenas síliceas son empleadas como materia prima en industrias de diversa índole, cada una de las cuales presenta diferentes exigencias en cuanto a las características fisicoquímicas de las mismas, también conocidas en la industria como especificaciones técnicas. De allí que, comercialmente, las arenas suelen adoptar nombres en función a sus usos, como por ejemplo arenas de fundición o de fracturación, entre muchos otros. Tal como se mencionó anteriormente, cada uno de estos términos involucra ciertos requerimientos en cuanto al contenido de cuarzo, porcentaje de impurezas, forma de los granos y /o distribución granulométrica de las partículas (Ciullo, 1996), así como también características asociadas a la coloración, dureza y resistencia a las altas temperaturas y presiones. Esta diversidad de especificaciones da como resultado una gran variabilidad en los costos y disponibilidad del material, dependiendo de quién sea el consumidor o usuario final.

La fuerte demanda de este mineral, ya sea como agregado único o como aglutinado con otro tipo de sustancias, radica en sus propiedades inherentes, principalmente relacionadas a su resistencia, conservando por ejemplo sus características físicas aún bajo condiciones de carga y altas temperaturas; y a su capacidad de ser químicamente inerte en un amplio rango de pH (Dirección General de Desarrollo Minero, 2012).

Históricamente, las arenas de sílice han sido principalmente empleadas en la industria de la fabricación del vidrio. Sin embargo, las mismas son requeridas también en procesos como la fundición, como constituyente de abrasivos o productos químicos a base de sílice, y en mercados tales como el de la cerámica, metalúrgico, el de la electrónica, la construcción, el ambiental y el energético, entre muchos más. A continuación, se describirá brevemente cada uno de los principales usos y sus respectivas especificaciones técnicas.

- Industria del vidrio: es el principal uso que ha tenido este tipo de arenas históricamente, ya que la sílice constituye aproximadamente, entre el 50% y el 80% del vidrio. Es empleada como materia prima en un sin número de productos, como por ejemplo en la fabricación de cristalería, envases, fibras, vidrios planos, vidrios verdes, vidrios ámbar o vidrios de usos químicos. Otros de los productos especiales que pueden obtenerse son las fibras ópticas y semiconductores, los vidrios de laboratorio o los vidrios livianos, como por ejemplo aquellos empleados en la fabricación de tubos de luz incandescente y fluorescente.

La industria del vidrio, en general, es una de las industrias más exigentes en cuanto a la calidad y homogeneidad tanto física como química de las arenas, esto se debe a que el vidrio debe ser muy constante en su composición para evitar la generación de defectos que resultan evidentes en el producto final. Tal es así, que una arena con menos del 99% de SiO_2 en su composición, no es considerada como de primera calidad.

Un bajo contenido de SiO_2 da lugar a la presencia de considerables cantidades de impurezas en las arenas, lo cual no sólo ocasiona defectos en la calidad de los artículos, sino que también genera inconvenientes en la producción como consecuencia de la necesidad de limpieza constante de los hornos de fundición. Así mismo, la principal limitante para los fabricantes de vidrio es la presencia de óxidos de hierro (Fe_2O_3). Este mineral genera coloración o tinción del vidrio y resultan muy acotados los productos en los que se admite el uso de decolorantes como medida paliativa. La tolerancia de estos óxidos, así como el de titanio, son mínimas y se aceptan sólo en la fabricación de botellas o vidrios ámbar.

Compuestos como el calcio y magnesio son nocivos para los vidrios solubles, y los óxidos de aluminio reducen la transparencia y dificultan los procesos de fundición.

En cuanto a las propiedades físicas de las arenas, en general se requieren granulometrías entre los 0,2mm y 0,5mm (Tabla 2) y se exige además que cada carga sea uniforme. En cuanto a la forma de los granos, deben ser preferentemente angulosos, ya que funden en masas mucho más homogéneas, mientras que granos redondeados tienden a generar burbujas imposibles de eliminar posteriormente.

Tabla 2. Límites de tamaño de grano requeridos en la fabricación del vidrio. Fuente: Dirección General de Desarrollo Minero (2012).

Malla Tyler N°	Abertura (mm)	Retención en la malla señalada
20	0.833	0%
42	0.351	20% Máximo
100	0.147	90% Máximo
200	0.74	100%

Existen muchas otras exigencias técnicas para esta industria, cuya descripción puede resultar muy amplia y no lleva a los fines del presente trabajo. Sólo a modo informativo, en la Tabla 3 se incluyen algunas de las principales especificaciones técnicas requeridas en función a la rama de la industria del vidrio en la que sea empleada la arena sílicea.

Tabla 3. Especificaciones técnicas para arenas síliceas por calidad de vidrio, según la Oficina de Normas de Estados Unidos.

Tipo de vidrio Calidad	SiO ₂ %Mínimo	Al ₂ O ₃ %Máximo	Fe ₂ O ₃ %Máximo	CaO+MgO %Máximo
Óptica	99.80	0.10	0.22	0.10
Cristal de mesa	98.50	0.50	0.035	0.20
Cristal de Flint	95.00	4.00	0.06	0.50
Vidrio cilindrado, varilla y vidrio pulido	98.50	0.50	0.06	0.50
Vidrio para placas roladas y pulidas	95.00	4.00	0.06	0.5
Vidrio natural, vidrio para ventana	98.50	0.50	0.30	0.50
Vidrio natural	95.00	4.00	0.30	0.50
Vidrio verde	98.50	0.50	1.00	0.50
Vidrio ámbar	95.00	4.00	1.00	0.50

- Industria de la cerámica: este tipo de material puede llegar a emplear hasta un 32% de arenas industriales en su composición, las cuales tienen como función generar la estructura o esqueleto de las piezas cerámicas, a la que se adosarán las arcillas y fundentes (Ministerio de Energía y Minería, 2017). La sílice, además de mejorar la calidad de la estructura y la apariencia de la pieza, tiene como función regular la expansión térmica, el secado y la contracción de la misma, así como también proporcionar blancura, translucidez considerable y resistencia a los ácidos. Por ejemplo, la sílice molida baja en hierro y la calcinada, es la que se emplea preferentemente en vajilla blanca para facilitar todas las características anteriormente mencionadas, además de favorecer la compatibilidad entre el cuerpo o estructura de la pieza cerámica y el esmaltado, evitando el agrietamiento (Ciullo, 1996).

Además, las arenas cuarzosas suelen mezclarse con otros materiales tales como el caolín, carbonato de calcio, feldespato, dolomita, magnesita y talco para lograr piezas de porcelana pura.

Las arenas silíceas son empleadas como materia prima en numerosos productos cerámicos, entre los que se encuentran los artículos sanitarios y losas, tanto para paredes como para suelos, y en la fabricación de vajilla, aisladores eléctricos de porcelana, bujías de encendido y condensadores. También constituye un componente fundamental del esmaltado de dichas piezas.

- Industria de la fundición: las arenas son empleadas como materia prima para la realización de corazones (o núcleos) y moldes de fundición de innumerables partes industriales y automotrices (Ramírez R., 2007), generalmente piezas metálicas de acero, hierro dúctil, hierro gris y aleaciones a base de aluminio y cobre.

Las arenas suelen ser empleadas en forma conjunta con otros minerales como la cromita, olivino o circón y aglutinantes como la bentonita. Preferentemente, las arenas de grano fino o medio son utilizadas para los moldes, mientras que las de grano grueso suelen usarse como núcleos (Ministerio de Energía y Minería, 2017). Las características de la mezcla a preparar dependerán del diseño y tamaño de la pieza, tipo de metal requerido, temperatura de vaciado y método de moldeo.

Independientemente de la aplicación, las ventajas del uso de arenas silíceas en la fundición radican en la resistencia que presenta el material aglutinado a la presión metalostática del metal que se está colando, a su permeabilidad óptima para el adecuado escape de vapores y gases, y a que tanto, la textura como la composición del molde permiten un vaciado íntegro, suave y sin reacción térmica al choque (Dirección General de Desarrollo Minero, 2012). Además, las arenas silíceas son mucho más baratas y de fácil disponibilidad comparado con otros sustitutos, como cromita, zircón u olivina.

Cabe destacar que estas arenas también son un importante constituyente en la fabricación de ladrillos refractarios. Sus ventajas son la resistencia a cargas importantes (3.5 kg/cm^2); pueden soportar altas temperaturas por debajo de su punto de fusión de cono (1710°C a 1730°C); tienen una alta resistencia a la abrasión y presentan una destacable resistencia al ataque de los principales fundentes de los hornos de acero, tales como la cal, óxidos de hierro y escorias ácidas. Así mismo, si se las compara con las arcillas refractarias, presentan una conductividad térmica un 25% mayor, a altas temperaturas.

- Industria de los abrasivos: en esta industria, las arenas silíceas suelen ser empleadas como cualquier otro tipo de abrasivos para el pulido o limpieza de superficies, para amolar, desgastar o remover materiales sólidos, ya sea por impacto y/o fricción. Las mismas pueden usarse como partículas o granos sueltos, por ejemplo, en los chorros de arena a presión; o ligados o cementados, como en el caso de las lijas o piedras de amolar.

En general, en este tipo de aplicación son requeridas las arenas cuyos granos se encuentran fracturados y que poseen bordes preferentemente angulosos (Ciullo, 1996). Existen numerosos tipos de productos, siendo el de mayor uso aquellos abrasivos de tipo granulados o sueltos, ya que además de su capacidad de corte y perfilado de superficies por abrasión y/o impacto, también presenta una amplia disponibilidad y un costo relativamente bajo (Ministerio de Energía y Minería, 2017), lo que los torna competitivos frente a otros

minerales abrasivos de calidades superiores, como el granate o esmeril. Su mayor aplicación es en la limpieza de superficies, siendo las arenas gruesas las utilizadas para la limpieza de estructuras de hierro o acero, mientras que las de grano fino, son empleadas para el pulido y limpieza de piezas más blandas como el aluminio o el latón, así como también en la limpieza de telas, en la industria textil.

Las llamadas arenas para *sandblasting* se utilizan para limpieza profunda y profesional que permite preparar la superficie para trabajos relacionados a mantenimiento y restauración. Este proceso con arena se realiza mediante el impacto a alta velocidad de las partículas sobre la superficie a limpiar permitiendo desprender la capa que se desea retirar, ya sea de pintura, óxido o suciedad sin dañar la superficie que se está trabajando.

- Industria electrometalúrgica: en esta industria, las arenas de sílice son usadas en conjunto con otras formas de sílice, tales como la grava silíceas, el cuarzo granulado y los trozos de cuarzo, para la producción de silicio metálico, según cita el Ministerio de Energía y Minería de la Nación en su publicación sobre el panorama del mercado del cuarzo (2017). Existen distintos tipos de este producto según la pureza de la sílice empleada, siendo algunos de los ejemplos el silicio metálico de tipo electrónico, utilizado en la fabricación de semiconductores; el químico, usado en la producción de siliconas y silanos; o el de tipo metalúrgico, empleado en la refinación secundaria del aluminio.

Otra de las aplicaciones citadas en la misma publicación es la del uso de las arenas en las aleaciones silíceas o como fundente de metales como el hierro, níquel, cinc, cobre y plomo.

En la industria eléctrica propiamente dicha, las arenas silíceas, en conjunto con el caolín, cobran cada vez mayor importancia a la hora de fabricar piezas cerámicas, principalmente utilizadas como aislantes de baja y alta tensión, aptas tanto para uso doméstico como para voltajes superiores. Algunos ejemplos son aisladores para paredes o cables, bobinas, carretes, casquillos, cajas de distribución, de interruptores, fusibles, planchas, etcétera (Dirección General de Desarrollo Minero, 2012).

- Industria química: este ítem hace hincapié en la fabricación de productos intermedios a base de sílice, como por ejemplo el silicato de sodio, cloruro de silicio, compuestos organosilíceos, así como siliconas y sílica gel (Dirección General de Desarrollo Minero, 2012). Cada uno de estos productos tienen aplicaciones especiales, cuya descripción no viene a los fines del presente trabajo. Por lo tanto, se resume que se trata de compuestos de gran importancia en la constitución de fórmulas de pinturas, detergentes, morteros especiales u hormigones, y que resultan la materia prima básica para la obtención de silicio y la elaboración de refractarios de sílica y arenas de moldeo.

- Mercado ambiental: aquí se hace referencia al uso de las arenas silíceas durante procesos de mitigación de impactos ambientales en las industrias, tales como las industrias químicas, del cemento, petroleras o mineras. En general, este tipo de arenas son usadas como elementos filtrantes en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Sin embargo, no es el único mercado en el cual las arenas silíceas son empleadas como filtrantes. Es muy común su uso como auxiliar en la filtración de agua para consumo humano o directamente como filtro en la producción de agua de pozo (Ministerio de Energía y Minería,

2017). En este caso los requerimientos se basan en estar libres de arcillas, polvo, minerales micáceos o materia orgánica.

- Mercado energético: aquí se hace referencia a las comúnmente denominadas arenas de fracturación, tipo de arena sobre la que se tratará en forma detallada a lo largo del presente trabajo. Se trata de arenas aplicadas en la industria petrolera, tanto durante la etapa de exploración como de producción.

La inyección a presión de estas arenas en los pozos petroleros no convencionales tiene como finalidad mantener las fracturas abiertas de modo de poder generar conductividad, permitiendo así que los diversos hidrocarburos puedan fluir más fácilmente. Para tal fin se emplean preferentemente arenas silíceas de granos bien seleccionados y redondeados, de modo de facilitar el emplazamiento de estas durante el proceso de fracturación, además de lograr la máxima permeabilidad posible (Ciullo, 1996; Peñarada, 2014).

- Materiales de construcción y recreación: las características relacionadas con la forma natural de los granos, así como la posibilidad de controlar la distribución granulométrica de las partículas, permite que la arena silícea se convierta en un material de gran importancia durante la preparación y mantenimiento de suelos destinados al cultivo. Estas características son indispensables a la hora de controlar la permeabilidad, así como la compactación y aireación de los suelos o los niveles de pH, favoreciendo finalmente al desarrollo de los cultivos.

En lo que respecta a la construcción, la arena industrial también juega un rol importante como componente estructural primario de productos tales como superficies antideslizantes, pisos, morteros, estuco, tejas (Ministerio de Energía y Minería, 2017). La arena es esparcida sobre morteros o recubrimientos epóxicos para lograr transferir la propiedad antideslizante a pisos de piscinas, exteriores de residencias, baños o zonas industriales. También se utiliza para la fabricación de asfalto, pavimentos y cementos especiales a prueba de ácidos, también denominados cementos hidráulicos (Dirección General de Desarrollo Minero, 2012). Así mismo, es empleada en mezclas con resina epóxica, para la reparación de grietas, fisuras y para mejorar superficies de concreto dañadas, así como para mejorar las superficies en general, previo a la aplicación de otros recubrimientos. Cualquiera sea el caso, las arenas silíceas son empleadas por su gran resistencia al desgaste, lo que lo hace un material mucho más duradero que otros sustitutos disponibles en el mercado. Siguiendo en el ámbito de la construcción, alguno de los productos más recientes elaborados con estas arenas, son los ladrillos sílicocalcáreos, capaces de resistir 230 kg/cm² más de carga que los ladrillos de construcción convencionales (Dirección General de Desarrollo Minero, 2012).

Desde el punto de vista recreativo, la arena silícea también es empleada en la construcción de campos de golf y de atletismo. Actualmente, a partir de la modificación de su superficie, es usada como arena para juego, ya que se ha logrado colorear, obteniendo una gran variedad de tonalidades (Ministerio de Energía y Minería, 2017). También tiene uso decorativo en parques y jardines.

- Otras aplicaciones: existen un sinnúmero de usos para las arenas silíceas, de los cuales se quiere destacar el de relleno de plásticos o hule, utilizada en forma de harina. También es empleada como ornamento en pastas de alta resistencia para revocar muros o piscinas, y en la

fabricación de resinas de protección al desgaste (Dirección General de Desarrollo Minero, 2012).

Otro de los ejemplos son el uso como arena en peceras o acuarios, o arenas mezcladas con caparazones de ostras trituradas, para aves de corral, palomas y pericos (Ministerio de Energía y Minería, 2017).

4.1.c. Sustitutos

Existen en el mercado una amplia variedad de sustitutos de la arena silícea, cada uno de ellos con sus respectivas ventajas y desventajas, y condicionados a la aplicación para la que sea utilizado.

Una publicación sobre el perfil del mercado de la sílice, realizado por el Gobierno de México en el año 2017, describe a la piedra molida como uno de los materiales de mayor competencia con las arenas silíceas, ya que se presenta en el mercado de variados tipos y tamaños. En el mismo informe se menciona a la caliza molida como el principal sustituto en agregados para la construcción; a la arcilla, pizarra, esquisto, vermiculita, perlita, pómez natural y escoria, para los agregados de concreto; alúmina, carburo de silicio, granate, esmeril y diamante, en la industria de los abrasivos; y la cromita, olivino y zirconio, como sustituto en la elaboración de refractarios o moldes de fundición. Además, menciona específicamente al zirconio y mullita para la fabricación de moldes de fundición, para el caso de temperaturas y otras condiciones por encima de los límites de resistencia de las arenas silíceas. En relación con la aplicación como refractarios, describe a la arcilla, diatomita y bentonita, aunque todos ellos con ciertas desventajas debido a su menor resistencia al choque térmico.

Finalmente, según el USGS (2019), se están desarrollando agentes de sostén sintéticos como sustitutos de las arenas silíceas para la fracturación en la industria petrolera, más resistentes, capaces de adaptarse a las necesidades del pozo. Los productos más comunes son: arenas recubiertas en resina (curado completo), cerámicos con base caolín, bauxitas principalmente empleados en pozos profundos y de mayores costos.

4.1.d. Características de los depósitos en la Argentina

Los ambientes en los que típicamente se depositan este tipo de arenas son las costas marinas, idealmente someras, amplias y con una leve inclinación, ya que permite la depositación durante eventos transgresivos; así como también los ambientes fluviales afectados por la acción eólica, ésta última, encargada de redistribuir las partículas. Estos tipos de ambientes suelen presentarse dentro de un contexto geotectónico de margen pasivo y en áreas cratónicas. En nuestro país, es posible encontrar estas condiciones en sistemas litorales de margen pasivo del Mioceno – Holoceno y en ambientes fluviales actuales (Gozalvez *et al*, 2004).

-Yacimientos de arenas silíceas en la Provincia de Entre Ríos

Los depósitos localizados en la Provincia de Entre Ríos tienen su origen en los eventos transgresivos del Atlántico, ocurridos durante el Mioceno medio (mar Paranaense) y Pleistoceno superior – Holoceno. Estas ingresiones marinas accedieron al continente a través del Río de la Plata y Paraná, permitiendo así el depósito de arenas en las márgenes de los actuales ríos (Gozalvez *et al*, 2004). En la Figura 2 se indican los yacimientos de arena silícea dentro del mapa Geológico de la provincia de Entre Ríos.

Existen dos yacimientos destacados asociados a dichos eventos, los depósitos de Diamante e Ibicuy, ambos con importantes reservas de arenas silíceas cuya explotación incide fuertemente en la economía de la región. Las características de cada uno de ellos se describen a continuación.

-Yacimiento de Diamante

Este yacimiento representa una serie de acumulaciones de sedimentos fluvio-eólicos continentales litorales, ubicados en ambas márgenes del arroyo El Salto, a unos 3km de la localidad de Aldea Brasileira y a aproximadamente 30km al sur de la ciudad de Paraná (Fig. 2 y 3).

La constitución geológica del área está integrada por una secuencia sedimentaria cenozoica sin aparente disturbación tectónica. Los depósitos de interés se pueden observar en la parte más baja de los cortes naturales y canteras. Se trata de bancos subhorizontales de arenas de gran extensión areal alcanza los 2km² con espesores de entre 10 y 15 m, con intercalación de algunas lentes por tratarse de antiguos médanos sujetos a remociones eólicas. Los bancos suelen presentar una estratificación entrecruzada gruesa, según Gozalvez *et al* (2004), posiblemente de origen eólico, y lentes arcillosos, generalmente ubicados hacia la base. El material posee un destape de 25 m de potencia de niveles arenosos, limosos y loésicos entre otros. Presenta una muy buena selección, con una granulometría dominada por partículas de tamaño arena, con un 80% de cuarzo sin inclusiones, limpio, redondeado a sub-anguloso, 10% de cuarzo con inclusiones y el resto son minerales accesorios.

La ventaja de estos depósitos radica en su extracción, ya que casi no presentan cubierta y puede realizarse en forma directa mediante el uso de cargadores frontales o por dragado.

El Yacimiento de Diamante involucra grandes reservas, aunque la calidad de los bancos de arenas suele ser variables. En general se caracteriza por arenas de coloración blanquecina que, por sectores, se encuentran teñidas por óxidos e hidróxidos de hierro y que le otorgan una coloración rojiza. La Tabla 4 muestra un análisis granulométrico de las arenas de Diamante, extraído de Gozálvez *et al*, 2004. En el mismo es posible observar que el 98.40% acumulado de las partículas queda retenido en la malla 100, mientras que el 99.70% corresponde a la malla 140, logrando arenas con una moda de entre 0.250mm y 0.355mm.

Tabla 4. Análisis granulométrico de las arenas del Yacimiento de Diamante, Entre Ríos. Extraído de Gozálvez et al (2004).

Malla	% Acumulado	Moda (mm)
16	---	Entre 0.250 y 0.355
30	2.30	
40	13.60	
70	76.90	
100	98.40	
140	99.70	

Según análisis químicos presentados en la misma publicación, se trata de arenas con un 98.50% de sílice en su composición. En lo que respecta a la mineralogía, alrededor del 80% de los granos son de cuarzo limpio, sin inclusiones y con formas redondeadas a subangulosas, mientras que sólo un 10% son de cuarzo con inclusiones tales como apatito o rutilo, además de pátinas de óxidos e hidróxidos de hierro. Existen además escasos porcentajes de otros minerales como feldespato, calcedonia, máficos, opacos y accesorios, cuyas concentraciones se observan en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición mineralógica de las arenas de Diamante, Entre Ríos. Extraído de Gozálvez et al (2004).

Mineral	Contenido (%)
Cuarzo sin inclusiones	80
Cuarzo con inclusiones	10
Feldespato	5
Calcedonia	3
Anfíboles y piroxenos	1
Minerales opacos (magnetita)	<1
Turmalina, granate, apatito	accesorios



Figura 3. Explotación de arena silíceas en Diamante. Foto: El Diario (2019)

-Yacimiento de Ibicuy

El yacimiento de Ibicuy es uno de los más importantes del país y según el Ministerio de Energía y Minería de la Nación (2017), ha sido la fuente de abastecimiento más antigua de la industria vidriera argentina. Estos depósitos se encuentran ubicados entre las poblaciones de Mazzaruca y Holt (o Ibicuy), en el departamento de Gualeguaychú.

Se trata de arenas silíceas de calidad, dispuestas en cordones litorales con forma de media luna y que se desarrollan principalmente sobre el margen oriental del Río Paraná Ibicuy. Los bancos se presentan con una escasa cubierta, menor a 1m de potencia (Panorama Minero, 2008), lo cual también facilita su explotación mediante métodos de minado directo. El yacimiento presenta una extensión de 6 a 12km, un ancho por sectores de hasta 1km, y potencias de los mantos arenosos de aproximadamente 4m (Gonzalez *et al*, 2004). Estos mismos autores indican la presencia de estructuras de tipo entrecruzadas con lentes areno-arcillosos verdosos. También mencionan que los mantos de arenas se encuentran apoyados sobre arcillas y lentes arenosos con limos y arcillas.

Las principales características de las arenas de Ibicuy son su coloración blanco-amarillenta, la redondez de sus granos, su granulometría fina, la cual varía entre los 0.18mm y los 0.25mm, y su buena selección.

Composicionalmente, el 99.70% del depósito está constituido por minerales livianos, de los cuales el 86% está representado por el cuarzo. Alrededor del 83% del cuarzo no presenta impurezas, mientras que el porcentaje restante las contiene en forma de pátinas, inclusiones, en los contornos de los granos o como relleno de cavidades y marcas. Los restantes minerales de la fracción liviana se encuentran representados por feldespatos (12%), y apenas un 2% lo constituyen fragmentos líticos. Sólo un 0.30% de los granos minerales de estas arenas son minerales opacos, la mitad de los cuales corresponden a ilmenita y magnetita. Los análisis mineralógicos detallan también la presencia de muy escasas cantidades de otros opacos, tales como estauroлита, leucóxeno, turmalina, circón, hematita, rutilo, hornblenda, biotita y topacio.

Tabla 6. Análisis granulométrico de las arenas silíceas de Ibicuy, Entre Ríos, publicada por Gozálvez et al (2004), extraída de Celeda y Mari (1994).

Malla	% Retenido	% Fe ₂ O ₃ en la fracción	% Pesados en la fracción	Distribución (%)	
				Fe ₂ O ₃	Pesados
30	0.25	0.656	---	1.10	---
30-40	1.49	0.078	---	0.80	---
40-100	68.49	0.075	0.04	37.50	14.00
100-140	30.97	0.123	0.21	26.50	31.00
140	0.20	26.630	69.70	37.10	55.00

Tabla 7. Composición química de las arenas silíceas de Ibicuy, Entre Ríos, publicada por Gozálvez et al (2004), extraída de Celeda y Mari (1994).

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
Arena silícea	98.40	0.97	0.14	0.10	0.04	0.20

- Yacimiento del Río Jarilla, Provincia de San Luis

Se trata de depósitos cuaternarios de origen fluvial y eólicos modernos, los cuales serían producto de la meteorización de areniscas de edad terciaria. Los mismos han sido genéticamente clasificados por el SEGEMAR como depósitos de arenas silíceas de tipo sedimentarias y de placeres.

El yacimiento de Río Jarilla se encuentra ubicado a orillas del Río homónimo, aproximadamente a 75km al oeste de la localidad de San Luis. Se trata principalmente de mantos arenosos que recubren el cauce actual del río, con una extensión de aproximadamente 12km por 150m de ancho y una potencia promedio de 1.50m. Son considerados como recursos de carácter renovable y se explotan en canteras a cielo abierto desde el año 1972, mediante el uso de palas cargadoras y herramientas menores.

Según publicaciones del SEGEMAR para el año 2004, contaba con reservas estimadas de al menos 5.000.000 de toneladas, únicamente considerando los depósitos de arena silícea ubicadas sobre el cauce del río. A estas reservas deberían sumarse los montículos eólicos ubicados sobre las líneas de rivera y en los campos adyacentes (Ministerio de Energía y Minería, 2017), aunque no fue posible encontrar información relacionada a los volúmenes estimados. Para el 2008, Panorama Minero mencionaba la extracción de un total de 200.000 toneladas de arenas silíceas por un período de 30 años.

Composicionalmente, se trata de arenas con un contenido de cuarzo variable entre el 60% y 70%, entre un 25% y 30% de feldespatos, además de escasas cantidades de minerales accesorios, tales como muscovita, turmalina, magnetita, granate y fragmentos líticos (Gozálvez et al, 2004). Estas arenas se caracterizan, además, por una tonalidad amarillenta a pardo claro, como consecuencia de la presencia de hidróxidos de hierro, los cuales suelen representarse entre el 0.2 y 1% de su composición (Tabla 8). Tanto la coloración como su composición y contenido de impurezas, hacen que las arenas silíceas del Río Jarilla resulten de una calidad un tanto menor a las descriptas anteriormente para la Provincia de Entre Ríos, acotando su aplicación a la industria del vidrio, específicamente a la del tipo coloreado.

Tabla 8. Análisis granulométrico y de impurezas de las arenas silíceas del yacimiento del Río Jarilla, Provincia de San Luis. Extraído de publicación del SEGEMAR-IGRM (2004).

Malla	Abertura (mm)	% Retenido	Magnetita	Turmalina	Granate	Hierro total (%)
20	0.841	4.54	---	0.80	0.30	0.20-1.00
40	0.420	21.66	---	0.30	0.30	
80	0.177	52.48	0.12	0.25	0.18	
100	---	11.66	0.11	0.69	0.26	
200	0.0074	8.38	0.11	0.34	0.12	

En general las arenas de este depósito se caracterizan también por ser subredondeadas, con granulometrías medias a finas en los mantos de origen aluvial, mientras que los sedimentos eólicos presentan una mayor finura y selección.

- Yacimientos en Dolavon, Provincia de Chubut

Los yacimientos aquí explotados se ubican sobre la ruta provincial 40, aproximadamente a 80km de Dolavon. Comprende una serie de canteras ubicadas entre las localidades de 28 de Julio y Dolavon, entre las que se mencionan a Cantera Yatén, Pitu, Betina, Apacheta, El Gauchito, La Picada y La Porfía, entre otras.

El Ministerio de Energía y Minería de la Nación (2017) los describe como afloramientos de bancos de arenas cuarzosas de la Formación Salamanca. Su principal característica radica en el alto porcentaje de cuarzo de su composición, el cual suele superar el 98.90%. Son sedimentos friables a inconsolidados, de color translúcido, de granos subredondeados a redondeados, con escaso cemento, buena selección y una porosidad visual mayor al 50%. La Figura 4 muestra la explotación de arena silícea, a cielo abierto de Cantera Arenas Patagónicas en Dolavon, Chubut.



Figura 4. Cantera de arena silícea Arenas Patagónicas, Dolavon, Chubut. Fuente: <https://www.rionegro.com.ar>

- Depósitos de la provincia de Jujuy

En esta provincia se presentan algunos depósitos menores cuya explotación se realiza en forma esporádica. El Ministerio de Energía y Minería de la Nación menciona en sus publicaciones del año 2017 al depósito de Huancar Chico, ubicado en el distrito norteño de Cochinoca (Fig. 5). Se localiza específicamente a 7km al sur de la localidad de Abra Pampa, en el cerro Huancar. Representan acumulaciones de arenas silíceas de tipo mantiformes, de pequeño tamaño, de origen eólico y edad cuaternaria (Larcher *et al.*, 2008).

Otros depósitos de arenas silíceas son los ubicados entre las localidades de Humahuaca y Coctaca (Herrmann, 2008). Estos también son de edad cuaternaria y se caracterizan por ser grandes acumulaciones de arenas finas silíceas, blancas a rosadas y bien seleccionadas, con alrededor del 87% de partículas de tamaños entre los 0.063mm y 0.5mm. Composicionalmente, presentan altos contenidos de alúmina, hierro y calcio, concentrados principalmente en las fracciones gruesas o limo-arcillosas.

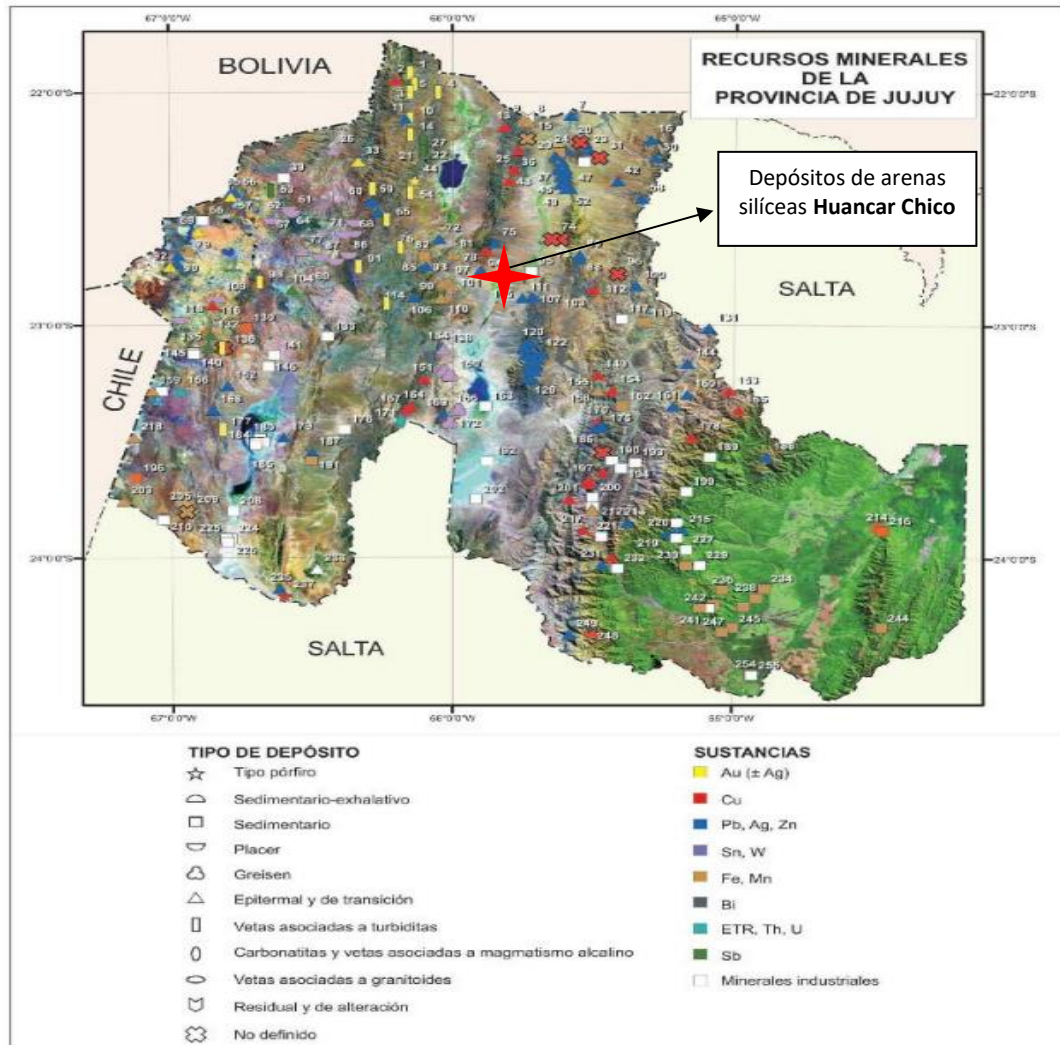


Figura 5. Mapa de los recursos minerales de la Provincia de Jujuy, modificado del Relatorio del XVII Congreso Geológico Argentino – Jujuy (2008). Detalle de los depósitos de arenas silíceas de Huancar Chico.

4.1.e. Marco legal

Merece una breve descripción lo que respecta a los aspectos legales de las arenas silíceas explotadas en la Argentina. En nuestro país, “los derechos, obligaciones y procedimientos relacionados a la adquisición, explotación y aprovechamiento de las sustancias minerales” se encuentra regido por el Código de Minería de la Nación. En el mismo los yacimientos o minas se encuentran clasificados en tres categorías, cada una de ellas con sus particularidades en cuanto a la naturaleza e importancia económica de las sustancias minerales, condiciones de presentación de los yacimientos, dominio o propietario y al régimen jurídico para su aprovechamiento, entre otras (Catalano, 1999).

Existe actualmente una gran controversia respecto a la clasificación de las arenas silíceas dentro del Código de Minería. En el mismo, las arenas en general, son sustancias minerales tratadas como áridos y por lo tanto, clasificadas dentro de la tercera categoría. Ello implica que las minas o yacimientos pertenecen únicamente al propietario del terreno y, salvo motivos de utilidad pública, nadie puede explotarlas sin su consentimiento. Esto radica en la abundancia de este tipo de minerales en la naturaleza.

Sin embargo, la actual importancia que han adquirido las arenas silíceas, en particular aquellas empleadas como agente de sostén en la fracturación hidráulica, ha generado una gran discusión sobre la necesidad de incluirlas como minerales de primera categoría. Las mismas poseen claramente un valor estratégico para el Estado, por lo que no debería explotarse como si fueran simples áridos para la construcción, ya que el aprovechamiento es por su “utilidad mineral”. Ser recategorizadas como una sustancia mineral de primera categoría implica tener importancia económica e industrial para el país. Es por ello que el Código establece que en este tipo de minas el suelo es un accesorio, que pertenecen exclusivamente al Estado y que sólo podrán explotarse en virtud de la concesión legal otorgada por la autoridad competente.

El cuarzo, principal componente de las arenas aquí tratadas, junto con el feldespato, fueron recategorizados por la Ley 19.240 sancionada en el año 1971. Los mismos fueron incluidos como minerales de primera categoría debido a su aplicación tecnológica de elevados costos en la industria manufacturera principalmente del vidrio y la abrasión, otorgando de esta manera la propiedad y dominio a las Provincias (Alric, 2015). A pesar de esto, el cuarzo dentro del Código de Minería, no tiene diferenciación según su origen, ya sea sedimentario, ígneo o metamórfico.

En la Argentina se encuentra actualmente en debate la situación de las arenas silíceas ya que en diferentes Provincias e incluso, dentro de una misma Provincia, existen yacimientos explotados en carácter de sustancias minerales tanto de primera como de tercera categoría. El mayor conflicto se da en la Provincia de Chubut, donde la empresa YPF, una de las principales operadoras consumidoras de arenas para la fracturación hidráulica de Vaca Muerta, ha adquirido yacimientos como de tercera categoría, asegurándose la explotación directa y el autoabastecimiento. Esta situación alienta a un polémico debate acerca del desconocimiento del principio de “utilidad pública” de este tipo de sustancias minerales, así como la competencia desleal de aquellos que obtengan minas como de tercera categoría, estando exentos del pago de regalías y realizando una explotación no racional de los recursos.

4.1.f. Producción nacional

Históricamente, los principales productores de arenas silíceas, generalmente para consumo en la industria del vidrio, han sido las provincias de Entre Ríos y San Luis, siendo la primera de ellas la más importante en cuanto a volúmenes de producción. También la provincia de Buenos Aires ha hecho sus aportes de arenas de la zona del delta y, en menor cantidad, del sector costero (Panorama Minero, 2008). Los depósitos ubicados en Chubut, actualmente están revalorizados a partir del auge de los procesos de fracturación en la industria petrolera. Como se mencionó existen algunos pequeños depósitos en las provincias de Jujuy y Río Negro, cuya explotación se realiza de forma esporádica.

-Provincia de Entre Ríos

Si bien los principales usos de las arenas silíceas de la provincia de Entre Ríos se encuentran relacionados con la industria del vidrio, en la actualidad existen otras aplicaciones que apuntan a industrias de diversa índole.

A partir de la investigación de material bibliográfico publicado en internet y de consultas en los registros de productores mineros de la provincia, publicados por el Gobierno de Entre Ríos, se tuvo conocimiento de dos de las principales empresas mineras encargadas de la explotación y sus respectivos productos: Aresil SA y Cristamine SA. Ambas empresas extraen arena en terrenos propios, es decir que su relación es directa con el municipio, dejando prácticamente sin incidencia para la habilitación y el control al gobierno provincial que sí interviene a través de la Secretaría de Ambiente y de la Dirección de Minería cuando la extracción de arena se hace desde el río.

Actualmente, Aresil SA se encuentra explotando canteras en Ibicuy. Según datos publicados en su página oficial, se dedica a este rubro desde hace 25 años, llevando a cabo las tareas tanto de extracción como de beneficio, clasificación, secado y comercialización. Esta empresa ofrece arenas de diversas calidades, entre ellas, *arenas silíceas húmedas*, destinadas a la industria del vidrio, cerámica y para silicatos; *arenas silíceas secas*, apropiadas para las industrias de la fundición y arenados; y *arena silícea clasificada*, apuntada a la industria del petróleo para los procesos de fracturación y como agente de sostén.

Por otro lado, Cristamine SA, con explotación de yacimientos tanto en Diamante como en Ibicuy tiene actividades desde el año 1962, siempre enfocadas a proveer materia prima de calidad para la industria del vidrio del país. Sin embargo, sus productos se han diversificado y a lo largo del tiempo han logrado comercializar arenas aptas para diversas industrias. Alguno de los productos que ofrece son *arenas especiales y tratadas*, tanto *húmedas* como *secas*, estas últimas con alto contenido de sílice, bajo hierro y clasificada, apta para la elaboración de vidrio blanco. Posee también arenas de alta sílice, clasificadas según diversas granulometrías, arenas naturales que cumplen con especificaciones técnicas para la fracturación hidráulica de pozos petroleros y arenas silíceas secas y molidas en diversas mallas (#100, #150, #200, #250 y #325. Ver Fig. 6).



Figura 6. Arenas síliceas ofrecidas por la empresa CRISTAMINE, para aplicaciones en la industria petrolera. Extraído de <http://www.cristamine.com/>

Los mercados a los que esta empresa apunta, incluyen el mercado del vidrio, como proveedora de materia prima para la fabricación de vidrios planos, envases, cristalería y fibra de vidrio; el mercado de la cerámica, para la fabricación de pisos, revestimientos y esmaltes; la construcción, para la elaboración de mezclas adhesivas, revoques, revestimientos y placas de cemento; mercado del petróleo, ofreciendo arenas molidas para el proceso de cementación y arenas síliceas naturales para la fracturación hidráulica; y por último, el mercado de la fundición.

Se suma en la actualidad en la zona de Diamante, la empresa de capitales belgas Arenas Argentinas del Paraná, quien ha apostado al abastecimiento de arenas síliceas para su utilización en los procesos de fracturación hidráulica. Esta empresa firmó un acuerdo con la operadora Tecpetrol, propiedad del grupo Techint, a través del cual se comprometió a proveer 70 mil toneladas del mineral para las operaciones de fractura hidráulica que la firma realizará en el yacimiento Vaca Muerta a lo largo del año 2019. (<https://www.eldiario.com.ar/21982-proveera-arena-al-grupo-techint-la-firma-belga-que-opera-en-diamante/>). Las ventajas de esta empresa se relacionan con su reciente acondicionamiento de su planta de arenas de fractura (Fig. 7), en donde la explotación no se realiza en forma tradicional desde canteras, sino que se extrae directamente mediante el dragado del lecho del río Paraná, contando de esta manera con una disponibilidad de materia prima prácticamente inagotable (<https://www.revistapetroquimica.com/con-un-nuevo-proceso-revolucionan-la-provision-de-arenas-para-fractura-de-pozos/>). Dentro de sus productos, Arenas Argentinas del Paraná ofrece arenas de fractura en fracciones 30/50, 40/70 y 70/140 (Tabla 9).



Figura 7. Planta de arenas para fracturación hidráulica en la zona de Diamante. Extraído de <https://www.arenasargentinas.com.ar/es/arena-de-fractura>

Tabla 9. Características de las arenas de fractura ofrecidas por la empresa Arenas Argentinas del Paraná. Extraído de <https://www.arenasargentinas.com.ar/es/arena-de-fractura>

	Mineralogía	Gravedad Específica	Densidad Aparente	Redondez	Esfericidad	Solubilidad en ácido	Turbidez	Resistencia a la compresión
Malla	%	g/cc	g/cm ³	Krumbein	Krumbein	%	FTU	Valor K
30/50	99+cuarzo	2,65	1,52	0,6	0,7	1,3	<60	4K-5K
40/70	99+cuarzo	2,65	1,52	0,6	0,7	1,3	<60	7K-8K
70/140	99+cuarzo	2,65	1,52	0,6	0,7	1,3	<60	9K+

La Figura 8 a y b indican la producción en toneladas de arenas síliceas para la provincia de Entre Ríos y su producción en la cantera Ibicuy. Esta alcanzó en el año 2018 un volumen de 1.5 Mt.

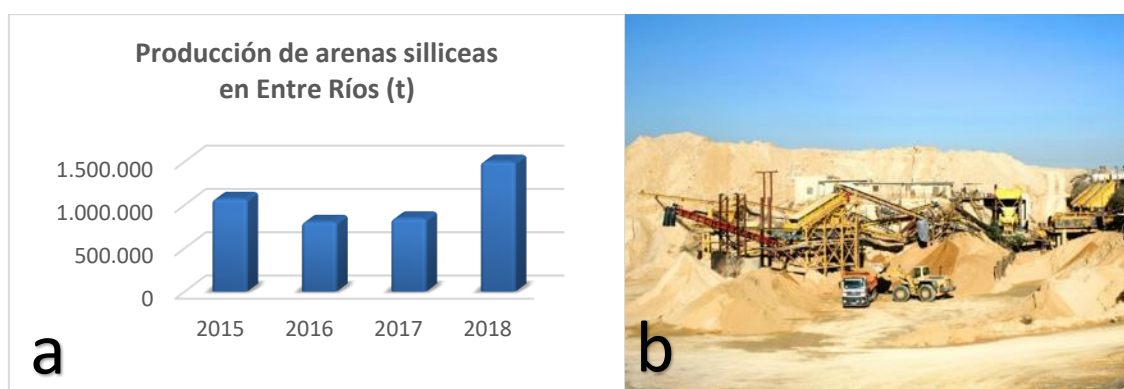


Figura 8 a. Producción de arenas síliceas en Entre Ríos, expresadas en toneladas Fuente: Dirección de Estadística Minera.; 8 b. Cantera Ibicuy Fuente: <http://fmsur1045.com/ibicuy>

-Provincia de Chubut

La segunda provincia con mayor incidencia en el mercado de las arenas para fracturación, es Chubut, con numerosas canteras localizadas en la zona de Dolavon, entre las que se destaca actualmente el yacimiento La Picada y La Esperanza. La empresa que opera en este sector corresponde al Grupo Arenas Patagónicas, con capitales 100% argentinos y desarrollados en su totalidad en la provincia de Chubut. Las arenas tienen un índice de pureza del 97.80% en sus diferentes granulometrías, sin proceso previo de lavado. La pureza junto con su redondez y aptitud de resistencia a la compresión, permite que las arenas puedan ser empleadas tanto en la industria del vidrio como en la explotación de yacimientos petrolíferos no convencionales, específicamente en el proceso de fracturación secundaria (Ministerio de Energía y Minería, 2017). Este último mercado es al que actualmente apunta la empresa encargada de la concesión de dichas canteras, tornándose su principal aplicación. Ésta cuenta con una planta de arenas síliceas (Fig. 9) con aplicación directa en la fracturación hidráulica y procesa actualmente entre 30.000 y 35.000t al mes, es decir alrededor de 400.000t al año (Hughes, 2019). El principal consumidor de estas arenas lo constituye YPF.



Figura 9. Planta de procesamiento de arenas silíceas del Grupo Arenas Patagónicas, ubicada en la zona de Dolavon.

Las especificaciones técnicas de los productos ofrecidos por el Grupo Arenas Patagónicas se detallan a continuación en la Tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones técnicas de las diferentes arenas silíceas para fracturación ofrecidas por el Grupo Arenas Patagónicas. Extraído de <http://arenaspatagonicas.com.ar/datostecnicos.html>

	#12/20	#16/30	#20/40	#30/50	#30/70	#40/70	#70/140
Compresión	3	4	5	6	7	8	9
Esfericidad	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7
Redondez	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6
Turbidez (NTU)	6	8	5	7	7	10	13
Solubilidad (%)	4.3	1.3	1.3	0.8	2.1	2.3	4.3

4.1.g. Mercado: características y dimensiones

El Ministerio de Energía y Minería de la Nación presentó en el año 2017 un informe acerca del panorama del mercado de minerales industriales como el cuarzo, donde hace un análisis en particular sobre las arenas silíceas. En el mismo menciona que, de todas las posibles aplicaciones previamente descritas, existen tres sectores económicos en los que este mineral es principalmente demandado: la industria metalúrgica, la industria del vidrio y la electrónica. Sin embargo, el consumo de este puede sufrir variaciones, principalmente debido a la creciente implementación de sustitutos, como la cerámica y los polímeros, para los procesos de fundición y/o de fabricación de vidrios. Otro de los factores que afectan al consumo de arenas para vidrio, principalmente en los países más industrializados, es el paulatino aumento del reciclaje de dicho material, proceso realizado con el fin de reducir la cantidad de residuos generados.

Otro de los mercados no mencionados entre los más importantes en el informe, pero sin duda actualmente en auge, es el petrolero, cuya demanda de arenas silíceas ha ido en crecimiento tras los avances en los procesos de fracturación de yacimientos no convencionales. Cabe mencionar que el consumo de arenas de fractura también se ve fuertemente afectado por las variaciones del mercado, específicamente dadas las fluctuaciones en los precios del gas natural y petróleo. Otros factores, que se hacen extensivos a todos los minerales en general, que incidirán en la viabilidad de la extracción y, consecuentemente en el mercado, serán los inherentes a la distribución geográfica de los depósitos, las restricciones ambientales que puedan existir, además de las exigencias de calidad en función al uso que se les vaya a dar. Estas características afectarán más fuertemente

al mercado de las arenas síliceas en particular, dado su costo menor en comparación con otros minerales industriales.

A continuación, se procederá a describir las características del mercado de arenas síliceas, presentando tanto el escenario a nivel mundial como nacional. En el mismo se considerarán volúmenes de producción, importación, exportación y consumo aparente, así como la demanda discriminada por sector industrial. Los datos expuestos a continuación han sido extraídos de informes presentados por el Ministerio de Energía y Minería de la Nación (2017), el US Geological Survey (2018) y la Dirección General de Desarrollo Minero de México (2012).

-Escenario mundial

Históricamente, el principal consumidor y también productor de arenas síliceas del mundo, ha sido Estados Unidos. Para el año 1996, del total de toneladas de arenas y gravas industriales producidas por dicho país (aproximadamente 25 millones de toneladas métricas), sólo un 6% representaban gravas, mientras que alrededor de un 40% eran arenas para vidrio, un 20% de fundición, 7% abrasivas y finalmente, un 6% eran arenas de fracturación hidráulica (Ciullo, 1996). Ya para el año 2011 la producción en dicho país había incrementado a 26,5 millones de toneladas y los consumos cambiaron considerablemente, teniendo el fracturamiento hidráulico un 41% de la participación; el vidrio, un 26%; las arenas de fundición, un 11%; productos para la construcción, un 6%; y los abrasivos tan sólo un 2% de participación. Este mercado se ha visto sólo ocasionalmente afectado, por ejemplo, en los años 2014 y 2015, por la caída en el precio del petróleo y gas, y su consecuente disminución de la demanda de arenas para la fracturación.

Las Figuras 10 y 11, publicadas por el US Geological Survey, muestran información sobre la producción mundial de arenas y gravas durante los años 2017 y 2018. Del análisis de la misma surge que, en forma aproximada Estados Unidos genera el 43% de la producción, seguido de los Países Bajos (19%), Italia y Turquía (5%), mientras que los restantes países no superan el 5% de la producción mundial (Fig.10).

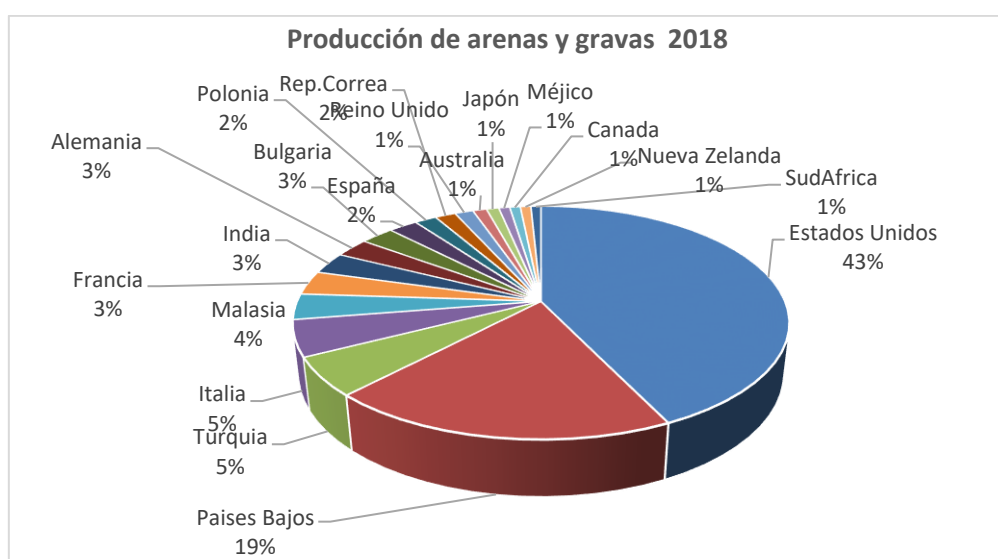


Figura 10. Producción de arenas y gravas durante el 2018, en porcentaje. Fuente: US Geological Survey (2018).

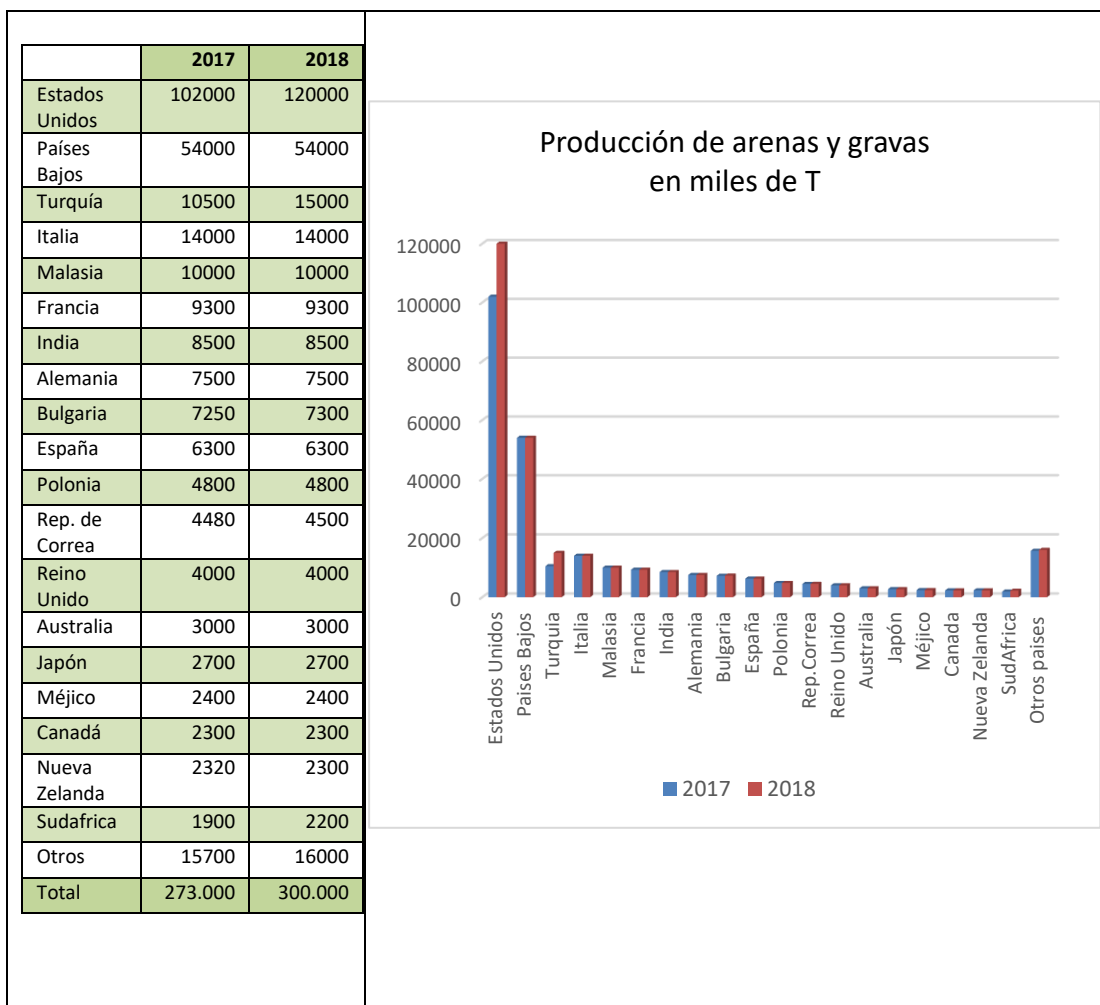


Figura 11. Producción de arenas y gravas durante el 2018, expresado en miles de toneladas. Fuente: Mineral Commodity Summaries, Geological Survey (2019).

Para el período 2010 a 2015, los principales países importadores de arenas silíceas y cuarzosa fueron Canadá, con el 20% de participación, seguido de Japón con el 8% y México con el 7%. Dichas importaciones, expresadas en millones de U\$D, puede observarse en la Figura 12 y Tabla 11.

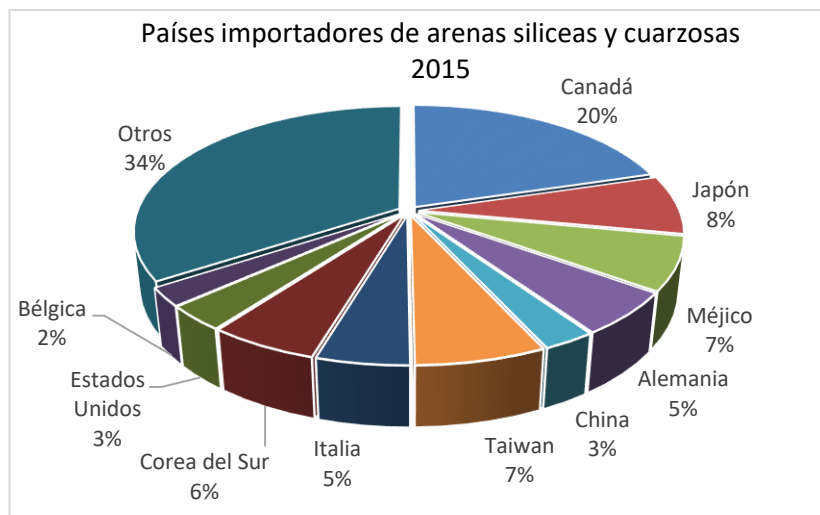


Figura 12. Principales importadores a nivel mundial de arenas silíceas y cuarzosas para el período 2010-2015, publicado por el Ministerio de Energía y Minería de la Nación (2017).

Tabla 11. Importación estimada de arenas silíceas y cuarzosas a nivel mundial, durante el período 2010-2015. Extraído de Panorama de mercado del cuarzo, Ministerio de Energía y Minería (2017).

Países	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Canadá	69.7	86.0	115.4	174.9	225.2	194.2
Japón	107.9	120.3	114.0	91.8	84.3	72.7
México	74.2	93.3	92.0	92.0	102.3	65.3
Alemania	69.9	70.4	54.4	55.3	62.5	53.1
China	85.9	101.0	72.8	32.9	31.9	25.9
Taiwán	46.7	58.2	51.7	62.1	64.1	64.9
Italia	59.6	68.6	54.2	52.6	56.8	45.5
Corea del Sur	47.7	58.0	52.9	49.5	57.1	53.6
Estados Unidos	65.7	103.3	43.3	21.6	41.0	30.4
Bélgica	32.8	43.0	37.7	35.8	33.8	22.7
Otros	368.8	421.0	330.8	362.9	391.8	326.2
Total	1028.9	1223.1	1019.2	1031.4	1150.8	954.5

Por su parte, los principales países exportadores de arenas silíceas para el mismo período (Fig. 13, Tabla 12), fueron Estados Unidos, involucrando alrededor del 36% de las exportaciones, seguido por Australia, con un 13%, Bélgica con el 9% y Alemania con el 6%.

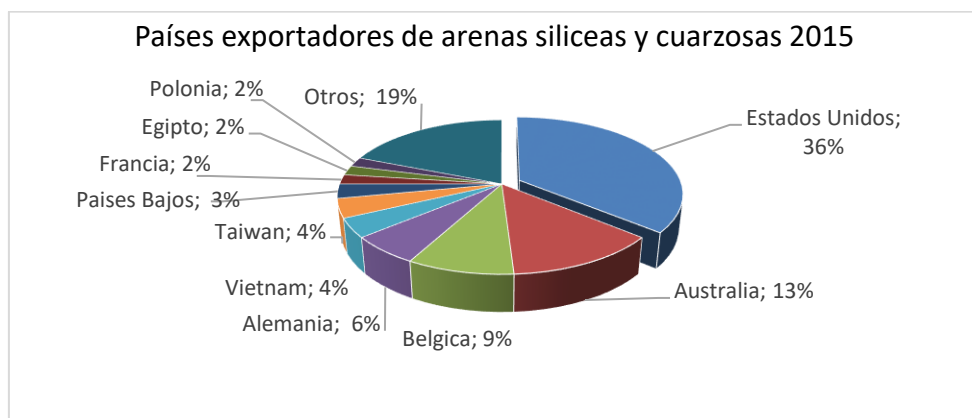


Figura 13. Principales exportadores a nivel mundial de arenas silíceas y cuarzosas para el período 2010-2015, publicado por el Ministerio de Energía y Minería de la Nación (2017).

Tabla 12. Exportación estimada de arenas silíceas y cuarzosas a nivel mundial, durante el período 2010-2015. Extraído de Panorama del mercado del cuarzo (Ministerio de Energía y Minería, 2017).

Países	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Estados Unidos	312.5	362.6	342.2	354.2	448.3	366.8
Australia	117.7	134.0	124.7	122.6	139.2	134.3
Bélgica	90.5	101.4	89.0	87.0	59.9	79.2
Alemania	67.0	58.7	58.5	59.8	72.3	52.3
Taiwán	47.2	47.6	40.7	35.4	36.8	33.7
Vietnam	4.3	41.4	35.9	40.0	42.9	27.4
Países Bajos	32.2	42.0	33.4	30.5	28.1	26.1
Francia	25.0	27.0	20.1	22.2	22.9	19.2
Polonia	5.4	18.5	23.3	15.3	19.1	17.3
Egipto	3.4	24.0	21.7	24.5	10.5	
Otros	175.0	224.1	195.4	181.0	209.2	178.2
Total	940.2	1081.3	984.9	972.5	1089.2	934.5

-Escenario Nacional

En la Argentina, los minerales industriales no metalíferos representan un 14% de la producción nacional, y dentro del mismo, el 3.53% corresponde específicamente a la producción de arenas silíceas (Fig. 14, Dirección de Estadística Minera en base a información de Direcciones Provinciales de Minería y Productores mineros, 2019).



Figura 14. Producción Minera Argentina 2017. Fuente: Dirección de Estadística Minera en base a información de Direcciones Provinciales de Minería y Productores mineros, 2019

Esta materia prima ha sufrido variaciones a lo largo del tiempo, acorde a los mercados emergentes y a las fluctuaciones en la demanda.

De la integración de la producción de arenas silíceas publicada por Panorama Minero (2008) surge que, para el año 2004, el 51% de la participación la tenía la provincia de Entre Ríos y el 44% Buenos Aires, mientras que sólo un 4% y 1% era aportados por las provincias de Chubut y San Luis, respectivamente. A lo largo del tiempo, la participación de las provincias ha ido cambiando. Para el año 2017, la producción de arenas de la provincia de Entre Ríos representó, alrededor del 74% de las arenas silíceas del país, equivalente a 845.150 toneladas (Fig. 15, Dirección de Estadística Minera en base a información de Direcciones Provinciales de

Minería y Productores mineros, 2019). Para el mismo año, Chubut representó el 26 % (289.034 toneladas) y el 0.2% restante (2.556 toneladas) fue aportado por la provincia de Río Negro.

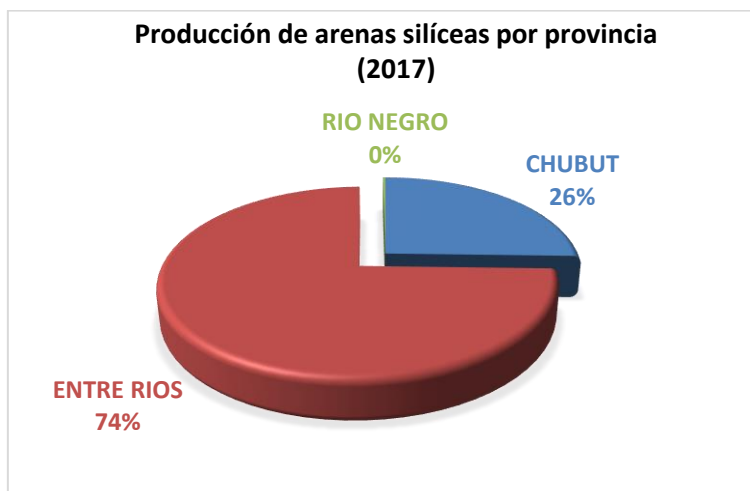


Figura 15. Producción de arenas silíceas por provincia (2017)

En séptimo lugar, con una participación del 4% del total de importaciones de rocas y minerales industriales del período 2015-2018, se ubican las arenas silíceas y cuarzosas. (cima.minem.gob.ar). El promedio anual importado fue superior a las 45 mil toneladas por un valor CIF promedio cercano a los 33,25 millones de dólares. El principal país de origen de estas importaciones fue Estados Unidos (Dirección de Estadística Minera. Fuente: Indec). Mayor detalle, se incluye en la Tabla13.

Tabla 13. Importación de arenas silíceas y cuarzosas periodo 2015-2018. Fuente: Dirección de Estadística Minera. Fuente Indec.

	2015		2016		2017		2018	
	USD CIF	T	USD CIF	T	USD CIF	T	USD CIF	T
Alemania	48.211	35	159.428	118	54.360	35	100.255	62,8
Bélgica	13.658	47	33.076	128	21.942	77	41.305	143
Brasil	6.197	27	1.644.114	10.451	3.613.396	25.046	9.044.162	58.151
Chile	1.400	1	17.355	17	13.847	12	2.586	4
China		0		0	18.491	54	2.003	3
España	1.293	1		0	59.135	520	487.319	5.075
Estados Unidos	48.804.568	117.051	8.036.134	30.572	5.504.417	23.449	11.079.074	44.986
Italia	70.254	241	65.256	224	30.253	99	30.175	91
Países Bajos		0	154	0	15.719	38	83.364	91
Portugal	63.487	598	341.379	3.640	417.418	4.420	280.717	2.990
Reino Unido		0		0		0	912	0
Rep. Checa		0	86.219	21	14.414	23		0

Las arenas silíceas han experimentado un aumento notable de la demanda respondiendo al proyecto hidrocarburífero de Vaca Muerta, en Neuquén. La cantidad necesaria ha convertido este insumo en un costo gravitante en la explotación y desde el inicio de la operación de este proyecto se ha sustituido gradualmente la importación de arenas silíceas

primero por las que se encuentran en Entre Ríos (de excelente calidad para *fracking*) y luego por las de Chubut (cima.minem.gob.ar).

En el mismo periodo Argentina ha exportado principalmente a Uruguay y a otro comprador “confidencial” según lo informado en (Dirección de Estadística Minera. Fuente Indec). Mayor detalle en la Tabla 14.

Tabla 14. Exportación de arenas silíceas y cuarzosas periodo 2015-2018. Fuente: Dirección de Estadística Minera. Fuente: Indec.

	2015		2016		2017		2018	
	U\$D Fob	T	U\$D Fob	T	U\$D Fob	T	U\$D Fob	T
Bolivia	56.835	57,9	7.844	3,3	10.295	21,8	175	0,3
Brasil					262	87		
Canadá			1.570	3,0				
Chile	62.746	475,0	108.703	582,4	48.847	305,5	7.280	56,0
China					10	15		
Confidencial							101.583	670, 6
Ecuador	4.460	23,5	2.760	12,0	3.300	15,0		
Estados Unidos	260	0,2	1.620	0,5	773	1,4		
Francia			180	0,1				
Irlanda							180	3,6
Italia			23	0,1				
México	2.600	13,0						
Paraguay	35.905	22,2	17.609	14,2	9.016	9,9	890	0,2
Suiza		0,0			20	0,5		
Uruguay	50.658	333,4	212.646	1436,2	71.025	435,1	93.092	610,0
Venezuela	7.140	35,7						
Noruega					2000	2		

Tomando como referencia el período 2001-2017, es posible observar que la producción promedio de arenas silíceas en la Argentina es de 607.341 toneladas anuales (Fig. 16). Los volúmenes de producción fueron incrementando a partir del año 1998, seguramente asociado al creciente consumo de arenas en la industria del vidrio. En este sentido, cabe mencionar que el rubro ha sufrido una fuerte expansión, convirtiendo a la Argentina en el tercer productor más importante de América Latina.

Sin embargo, es posible observar también una fuerte caída en el año 2002, donde tan sólo fueron producidas unas 280.065 toneladas. Según datos del Gobierno de la Nación, esta brusca caída se debió a la merma en los volúmenes de producción de varias de las provincias influyentes en el mercado de las arenas, siendo Entre Ríos la que presentó una variación negativa del 98%; San Luis, un 91%; Buenos Aires, un 57% y finalmente, Chubut, con una disminución del 36%, respecto a la producción del año anterior.

Luego de esta caída, la producción comenzó a aumentar en forma significativa principalmente debido a que los depósitos de Entre Ríos comenzaron a superar la explotación

anual de más de 400.000 toneladas, con una caída del 20% en el 2009. Así mismo, en la Figura 17 es posible observar un pico máximo de 1.098.056 toneladas de arenas síliceas para el año 2015, coincidente con el aumento de un 40% de la producción de dicha provincia.

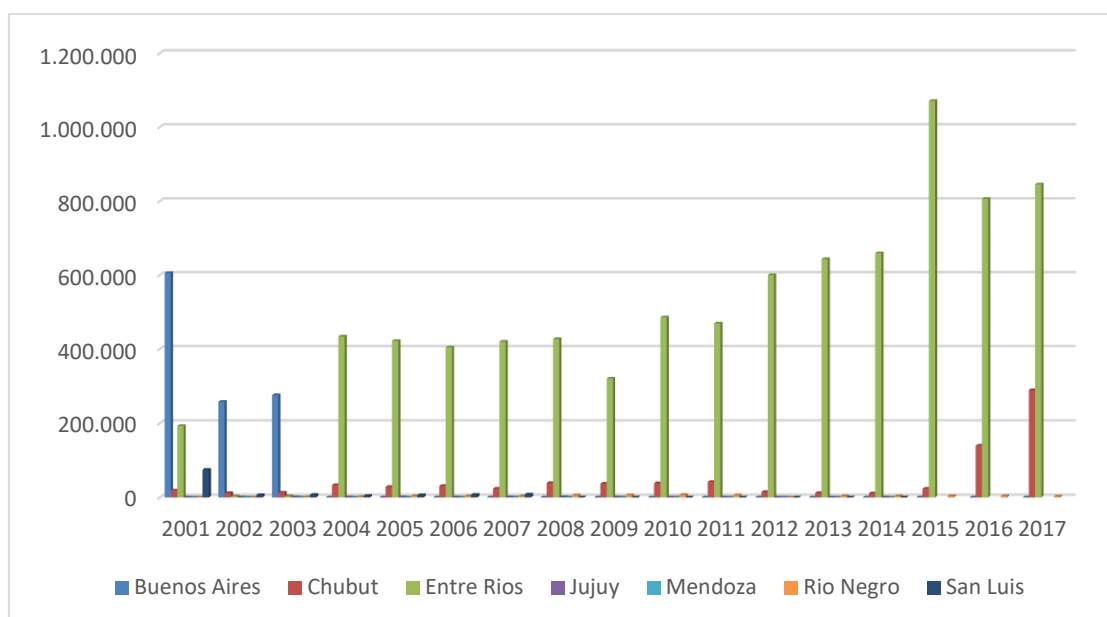


Figura 16. Producción nacional de arenas síliceas por provincia (periodo 2001-2017). Fuente: Dirección de Estadística Minera. Fuente Indec, 2019.

En lo que respecta al consumo aparente, término que hace referencia a la sumatoria de la producción e importación, menos la exportación, los valores fueron presentados en el año 2019 por la Dirección de Estadística Minera. (Fuente Indec, Tabla 15, Fig. 17). Los datos oficiales afirman que la mayor parte de la demanda de arenas síliceas es cubierta por la producción de los yacimientos locales y tan sólo un 5% en la actualidad debe ser importada. Estos valores de importación fueron disminuyendo desde el 2016 gracias a un aumento paralelo en la producción de materia prima nacional en 2017.

Tabla 15. Datos de producción, importación y exportación y Consumo aparente de arenas síliceas y cuarzosas en la Argentina, expresadas en toneladas y correspondientes al período 2010-2017. Fuente: Dirección de Estadística Minera. Fuente Indec, 2019.

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio
Producción	530856	516772	615256	658673	673253	1098056	949312.9	1136740	772364.9
Importación	233331	22318	21106	48097	118961	118.001.5	45171.5	53775.7	82595.21
Exportación	1002	1284	3488	1416	1881	960.9	2051.7	1340.7	1678.038
Consumo aparente	553185	537805	632873	705333	1215184	1215098	992432.6	1189174.7	731489

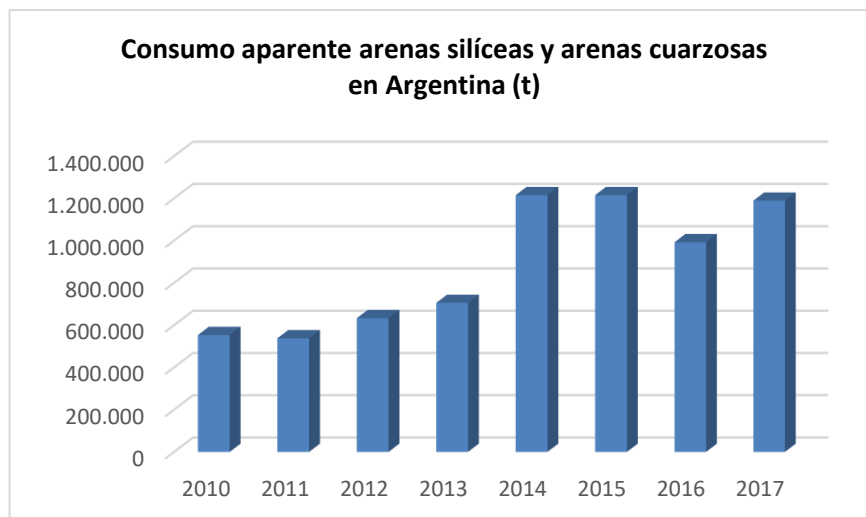


Figura 17. Consumo aparente de arenas silíceas y cuarzosas en la Argentina, expresadas en toneladas y correspondientes al período 2010-2017. Fuente: Dirección de Estadística Minera. Fuente Indec, 2019.

El porcentaje de importaciones mencionado anteriormente, equivale a un volumen estimado de 661 mil toneladas de arenas silíceas para el período 2010-2017. Su valor CIF (*Cost, Insurance and Freight*) es decir, el costo de la mercadería puesta en puerto de destino, con fletes pagos y seguro cubierto, superó los 161 millones de dólares (US\$). El 98% de esta materia prima tuvo como origen a los Estados Unidos y fue principalmente demandada por las industrias químicas, petroleras y de la fundición.

En lo que respecta a las exportaciones de arenas silíceas y cuarzosas nacionales, tal como se puede observar en la Tabla 13, siempre representa pequeños volúmenes de la producción, los cuales a pesar de incrementar hasta el año 2012, sufre posteriormente un brusco descenso del 75%, hasta el 2015 y un nuevo repunte en el 2016 ascendiendo un 21,4%. Los datos oficiales presentados por la Dirección de Estadística Minera estiman unas 13,4 mil toneladas para el período 2010-2017, equivalente a un valor FOB (*Free on board*) cercano a los US\$ 2.000.000. Cabe hacer la aclaración que dicho valor incluye al precio de la mercadería puesta a bordo de un barco con todos los gastos, derechos, impuestos y riesgos a cargo del vendedor, quién deberá responsabilizarse por la movilización de ésta hasta el puerto de origen, exceptuando los gastos de flete y seguro (Castro, 2016).

Como muchos de los países de la región, la balanza comercial es deficitaria a lo largo de todo el período (Fig. 18). La mayor diferencia que se observa en la balanza comercial está vinculada al volumen de las importaciones durante el 2014 y 2015 y una tendencia más equilibrada en los años 2016 y 2017, relacionada esta última a la mayor producción local.



Figura 18. Balanza comercial de arenas silíceas y cuarzosas 2010-2017. Fuente: Dirección de Estadística Minera. Fuente Indec, 2019.

Finalmente, haciendo referencia a los precios de comercialización de las arenas, tanto nacionales como internacionales, son muy variables ya que dependen de factores tales como el origen o destino de estas, grado de procesamiento que tengan, las especificaciones técnicas y calidades requeridas acorde a la aplicación y los volúmenes que se comercialicen.

4.2. Arenas para la industria petrolera

4.2.a. Generalidades

Tal como se ha mencionado previamente, el presente trabajo se basará en las arenas silíceas empleadas en la industria petrolera, específicamente para los procesos de fracturación. Previo al análisis detallado de este producto que ofrece el mercado de minerales industriales, se cree conveniente realizar una breve descripción acerca de qué son los yacimientos “no convencionales”, por qué deben realizarse procesos de fracturación y finalmente, cuál es la importancia del uso de arenas silíceas como parte del proceso.

Tal como su nombre los indica, un yacimiento no convencional en el ámbito petrolero, hace referencia a sistemas en los que los hidrocarburos son extraídos de forma diferente a lo que habitualmente se hace en un sistema petrolero convencional, pese a que las etapas previas de perforación son iguales para ambas.

Para una mejor interpretación cabe mencionar que los **sistemas convencionales** (Fig. 19 a y b) están formados por una roca “madre o generadora” que, tal como su nombre lo indica, da origen a hidrocarburos de distintos tipos. Esto es consecuencia de un alto contenido de materia orgánica inicial en la roca, la cual sufre procesos de maduración a lo largo del tiempo geológico ante la exposición a determinadas condiciones, principalmente de temperatura. Estos fluidos suelen migrar hacia otras rocas hasta alcanzar un sello, trampa o “techo” que impide que los mismos continúen migrando. Generalmente suelen quedar almacenados en rocas tales como las arenas, denominadas “reservorio”, cuya porosidad permite que queden allí alojados. Dadas las condiciones de porosidad y permeabilidad que presentan estas rocas reservorio, confinadas por la roca sello (rocas impermeables que actúan como “tapa” no permitiendo el desplazamiento o migración de fluidos tanto vertical como

horizontalmente), al ser perforadas y, por diferencias de presión, los hidrocarburos fluyen naturalmente hacia la superficie.

Teniendo en cuenta las características anteriores, se entiende entonces por **sistema no convencional** a aquellos yacimientos en los que los hidrocarburos no pueden migrar o fluir libremente, o al menos no en cantidades económicamente atractivas. Por ende, se necesita de procesos auxiliares de estimulación hidráulica para generar canales de permeabilidad secundaria que sí lo permitan. Estas situaciones se dan puntualmente en dos tipos de sistemas: las *tight sands*, también conocidas como gas en areniscas compactas, o de baja permeabilidad, las cuales han recibido la migración de hidrocarburos, pero cuya fábrica compacta no permite que estos fluyan libremente; y los *shale oil* o *shale gas*, que corresponden a petróleo o gas respectivamente, aún alojados en la roca generadora y que no han podido migrar dada la baja permeabilidad de la misma. Las Figuras 19 a y b esquematizan pozos de explotación tanto convencionales como no convencionales, con su respectiva fracturación

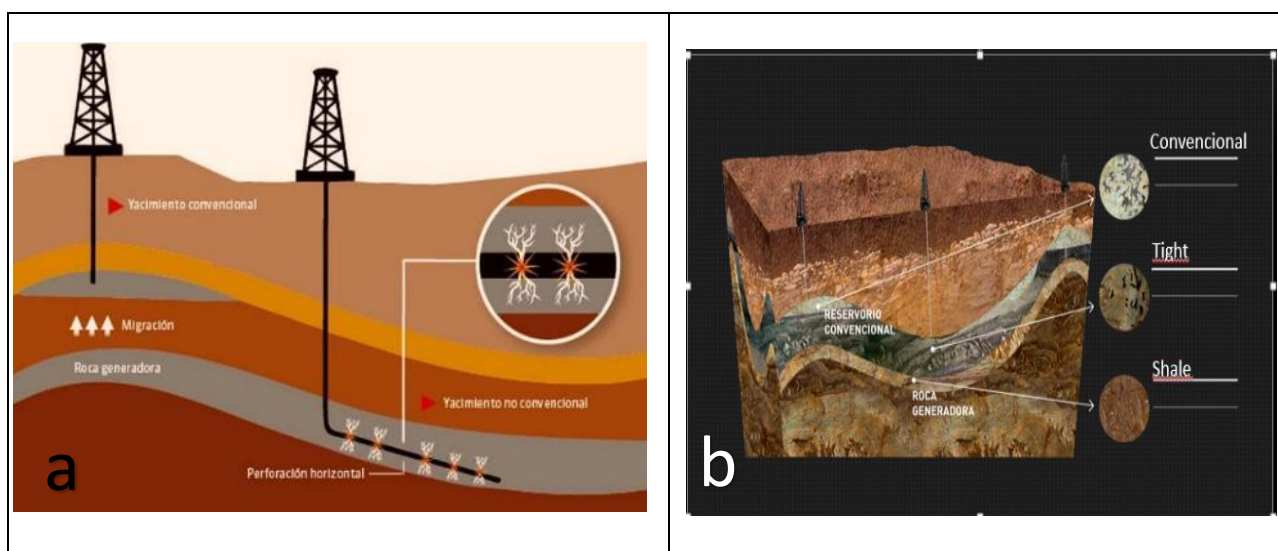


Figura 19 a y b. Esquema representativo de pozos de explotación comparando los sistemas convencionales y no convencionales, con su respectiva fracturación. Extraído de www.latam-energy.com y <https://www.ypf.com>

Si bien las operaciones de explotación en no convencionales son relativamente más complejas y costosas, su desarrollo surge como una necesidad de incorporar mayor cantidad de hidrocarburos al mercado. Esto se debe principalmente a dos factores, por un lado, en relación con que hace pocos años el mundo alcanzó su máxima capacidad de producción de hidrocarburos convencionales (YPF, 2013), y por otro, a la necesidad de disminuir los volúmenes de gas y/o petróleo importados en algunos países, como por ejemplo en la Argentina.

4.2.b. Yacimientos no convencionales en la Argentina

En Argentina existen 24 cuencas sedimentarias, de las cuales solo cinco son productivas (22% de la superficie total), en tanto que las otras se encuentran aún subexploradas o inexploradas (Fig. 20). Las reservas probadas de petróleo en Argentina rondan los 370 millones de m³.



Figura 20. Cuencas sedimentarias productivas y las actualmente no productivas www.shaleenargentina.com.ar

En la Argentina, la principal fuente de hidrocarburos provenientes de sistemas no convencionales es la Formación Vaca Muerta, localizada en la provincia geológica de Cuenca Neuquina (Fig. 21). Si bien el trabajo se focalizará en dicha Formación, cabe mencionar que existen otros yacimientos no convencionales en el país, aunque su conocimiento aún es escaso y se desconoce su potencialidad. Alguno de ellos corresponde a la Cuenca Chaco-Paranaense, Cuenca Austral y Cuenca del Golfo San Jorge, esta última, con trabajos exploratorios ya iniciados por YPF en otra roca madre de la Formación denominada D-129.

Las formaciones de *shale* en la Cuenca Neuquina

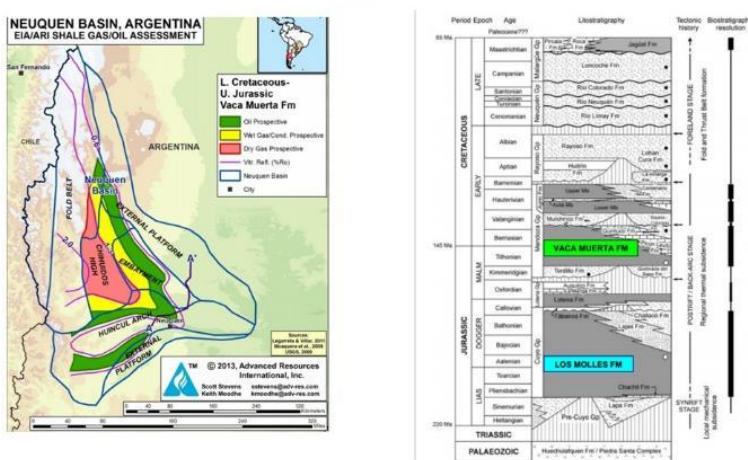


Figura 21. Mapa de la Cuenca Neuquina con detalles de la distribución de hidrocarburos en la Fm. Vaca Muerta y columna estratigráfica. Fuente: Advanced Resources International (2013).

En lo que respecta a la Formación Vaca Muerta, se trata de depósitos jurásicos (Thitoniense) de cuenca marina formadas por lutitas grises y negras, calizas micríticas y margas bituminosas, todas ellas finamente estratificadas (Caminos, 1999). Esta cuenca tiene una extensión areal, de aproximadamente 36.000km², abarcando casi la totalidad de la provincia de Neuquén, la porción sur de Mendoza y norte de Río Negro. Se trata de depósitos principalmente subhorizontales con espesores que varían entre los 60m y los 520m, logrando una potencia promedio general de 200m. La Formación Vaca Muerta constituye la roca madre o generadora de hidrocarburos de sistemas convencionales que han sido explotados históricamente en nuestro país. Con los cambios que se han dado en los últimos años a nivel mundial en materia energética y, tras el desarrollo de nuevas tecnologías, hoy en día se puede acceder a estas rocas generadoras a pesar de las profundidades en las que se localizan, pudiendo ser extraídos los hidrocarburos atrapados en ellas.

Las estimaciones sobre el potencial de *shale gas* y *shale oil* en la Argentina abren un nuevo panorama energético. Según un informe publicado por la Administración de Información Energética (EIA) del Departamento de Energía de Estados Unidos en el año 2013, la Argentina ocupaba el segundo lugar en el mundo en recursos no convencionales (shale) de gas técnicamente recuperable con más de 20 trillones de m³ (Tabla 16 y Fig. 22), y el cuarto en petróleo. Esto permitiría garantizar el autoabastecimiento energético, al menos por los próximos 50 años.

Tabla 16. Valores estimados de reservas de Shale Gas, técnicamente recuperables. Datos del US Department of Energy, 2011. Extraído de Ferrer Deheza & Montamat (2012).

		Reservas probadas de Gas Natural (Tcf)	Reservas técnicamente recuperables de Shale Gas (Tcf)
Europa	Polonia	5.8	187
	Francia	0.2	180
	Noruega	72	83
	Ucrania	39	42
	Suecia	-	41
América del Norte	Estados Unidos	272.5	862
	México	12	681
	Canadá	62	388
Asia	China	107	1275
	India	37.9	63
	Pakistán	29.7	51
	Australia	110	396
África	Sudáfrica	-	485
	Libia	54.7	290
	Argelia	159	231
América del Sur	Argentina	13.4	774
	Brasil	12.9	226
	Chile	3.5	64
	Paraguay	-	62
	Venezuela	178.9	11
	Subtotal	1171	6392
	Total en el mundo	6609	6622

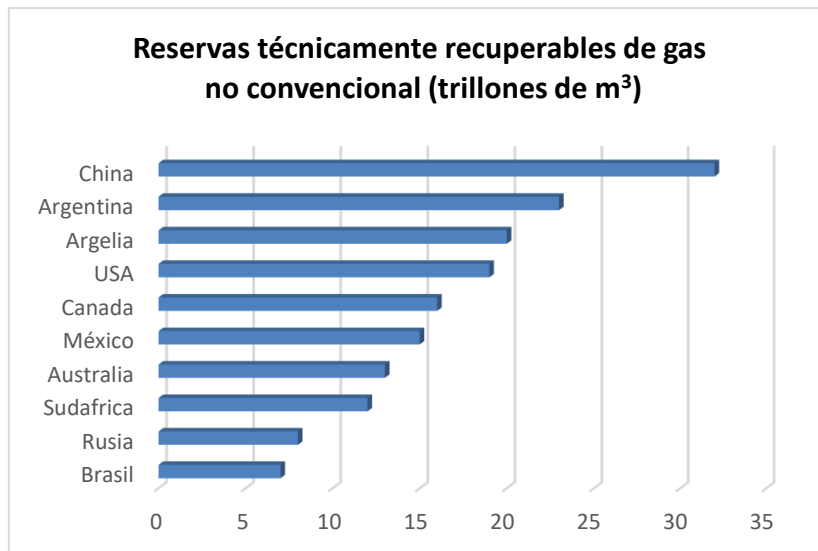


Figura 22. Datos de las reservas técnicamente recuperables de gas no convencional a nivel mundial, para el año 2013. Extraído de Braga et al (2017).

Más allá de las cuantiosas reservas que Vaca Muerta representa, su importancia también radica en cuatro parámetros geológicos que la tornan única en el mundo: su gran espesor, buena cantidad de TOC o Carbón Orgánico Total, alta presión y finalmente, buena permeabilidad.

Según datos publicados por Losa y Pruscino (2016), el primer pozo en dicha formación que fue sometido a procesos de fracturación hidráulica fue realizado en el año 2010, aunque recién en el 2013 comenzaron a realizarse sondeos de este tipo en forma más numerosa, logrando entrar en la etapa de desarrollo, al menos en algunas áreas de la Cuenca Neuquina. Inicialmente las perforaciones eran de tipo verticales, ya que los importantes espesores de la formación así lo permitían. Sin embargo, con el paso del tiempo, el avance en el entendimiento del reservorio y el conocimiento de las tecnologías empleadas se logra que a partir del año 2014 los pozos comiencen a realizarse en forma horizontal. En la actualidad, casi la mayoría son horizontales y suelen efectuarse varios de ellos en una misma locación, en forma de *pad*, optimizando costos y logística en casi todas las etapas, pero particularmente en la de fracturación. En relación con ello, los principales bloques en desarrollo dentro de la Cuenca Neuquina, en conjunto con sus respectivas operadoras, pueden observarse en detalle en el Anexo 1.

Un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) realizado por Losa y Pruscino (2016) para la explotación de *shale-gas* en la Provincia de Neuquén, describe ciertas características que influyen directa o indirectamente en el mercado de insumos, tales como las arenas silíceas sobre las que se tratará a continuación. Muchas de las fortalezas de este yacimiento ya han sido mencionados y, pese a las óptimas características geológicas que presenta Vaca Muerta y su ubicación, entre otras (Fig. 23), tiene varias debilidades principalmente relacionadas con la falta de conocimiento tanto tecnológico como del reservorio, la falta de infraestructura que, pese a que ha tenido mejoras, todavía resulta deficitaria principalmente en lo relacionado a la logística. Respecto a esto último, queda mucho por hacer en cuanto a disponibilidad y transporte de insumos, distancias, tiempos y sobre todo costos.

Si bien se trata de un proyecto muy reciente con importantes avances, aún requiere de grandes mejoras. Resulta importante hacer una apropiada evaluación sobre estas debilidades y amenazas expuestas en el FODA, de modo de no desaprovechar las oportunidades de crecimiento económico y en materia energética que Vaca Muerta implica. Además permitirá el desarrollo de las industrias y economías locales, incentivando a la generación de insumos y servicios varios, promoviendo la producción nacional y revirtiendo al mismo tiempo el déficit en la balanza comercial, consecuencia de la necesidad de importación de energía, insumos, etc.

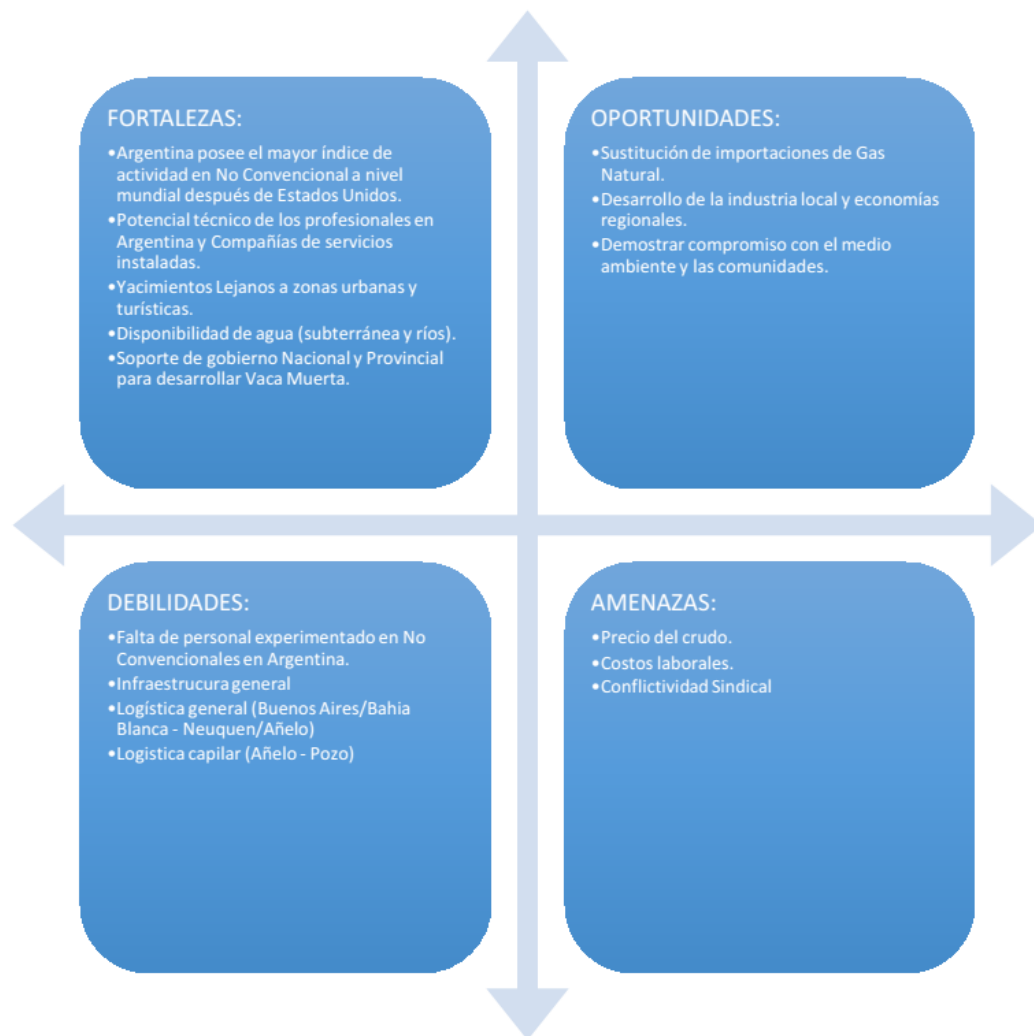


Figura 23 Análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) de la producción de Shale Gas en la Cuenca Neuquina. Extraído de Losa y Pruscino (2016).

4.2.c. Proceso de fracturación e importancia de las arenas

El **proceso de fracturación** propiamente dicho, también conocido como **fracking** o fracturación hidráulica es un proceso de estimulación de aquellas formaciones de tipo *tight* o *shale*, que contienen hidrocarburos entrampados en sus poros pero que, por falta de permeabilidad, no pueden ser liberados o extraídos en cantidades económicas. Básicamente consiste en una tecnología de inyección de fluidos a altas presiones, capaz de generar fracturas

o fisuras desde el pozo hacia la formación y cuya propagación da lugar a una permeabilidad secundaria.

Los fluidos de fracturación consisten comúnmente en una mezcla de agua con aditivos químicos, también conocido como *slickwater*, y el denominado *proppant*, propanante o agente de sostén. Si bien los fluidos de base acuosa son los más usados porque son fáciles de manejar, tienen bajos costos, alta performance, gran capacidad de soporte y son aceptables para el medio ambiente (Ferrer Deheza y Montamat, 2012), también existen otros en el mercado a base de geles o espumas. La composición, su consecuente viscosidad y reología, dependerá de muchos factores tales como el tipo de yacimiento o formación, el tipo de fractura que se desee obtener o la empresa encargada de las operaciones, entre otros.

Predomina el uso de fluidos en base agua (Fig. 24), generalmente mezclados con reductores de fricción, para facilitar el bombeo a mayor caudal, pero con presiones menores a las generadas que si se usara agua sola (Ferrer Deheza y Montamat, 2012). Según estos mismos autores, otros aditivos que suelen emplearse son ácidos diluidos, los cuales permiten remover el lodo de perforación de las paredes del pozo; productos tensioactivos, biocidas y bactericidas, para evitar el crecimiento de microorganismos; gelificantes y ruptores de geles; estabilizadores de pH, estabilizantes de arcillas, inhibidores de corrosión e incrustaciones, consumidores de oxígeno, cloruro de potasio, entre otros

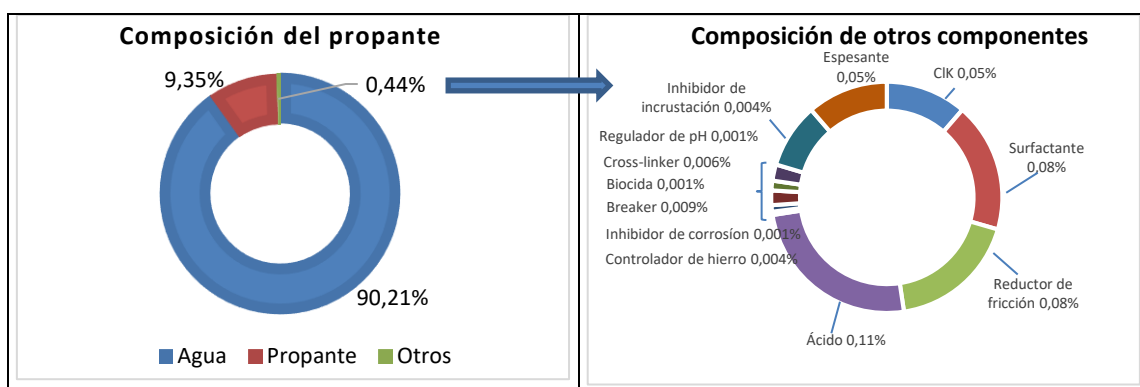


Figura 24. Detalle de la posible composición de los fluidos de fracturación. Izquierda, composición general del fluido; derecha, proporciones de los aditivos que constituyen el porcentaje considerado como “otros”. Modificado de Almeida Braga et al (2017).

El otro componente fundamental de la mezcla es el agente de sostén o *proppant*. El mismo puede consistir en partículas tales como arenas silíceas, arenas recubiertas por resina y/o partículas cerámicas artificiales, como ejemplos de las más usadas en la industria.

Como el objetivo final de la estimulación hidráulica es lograr grandes superficies de contacto con el reservorio para generar acumulaciones de hidrocarburos económicamente rentables, se deben realizar una serie de pasos durante la operación, los cuales se muestra en forma simplificada en la Figura 25. En primer lugar, se realiza la perforación del pozo en forma vertical hasta alcanzar la formación de interés. Se comienza a perforar generando una curva tal que permita que el pozo se horizontalice y navegue a lo largo del *shale*, operación que puede llevarse a cabo a lo largo de miles de metros. En la actualidad, las perforaciones realizadas en nuestro país en Vaca Muerta suelen tener profundidades verticales variables, mientras que las horizontales van de los 1.500m a más de 3.000m de largo, contados desde el *landing point* (punto de “aterrizaje” o en el que la perforación se hace horizontal) hasta el fondo del pozo.

Una vez acondicionado el pozo, se baja una pistola neumática al fondo de este y se realizan las explosiones correspondientes para generar las primeras fracturas. Posterior a esta operación, se inicia el proceso de *fracking* propiamente dicho, inyectando un fluido de fracturación presurizado que induce a la propagación de fisuras a lo largo de la formación. Los agentes de sostén o *proppants* presentes en dicho fluido son los encargados de apuntalar o mantener las fracturas abiertas, permitiendo así generar canales de permeabilidad secundaria, a lo largo de los cuales pueden fluir los hidrocarburos entrampados.

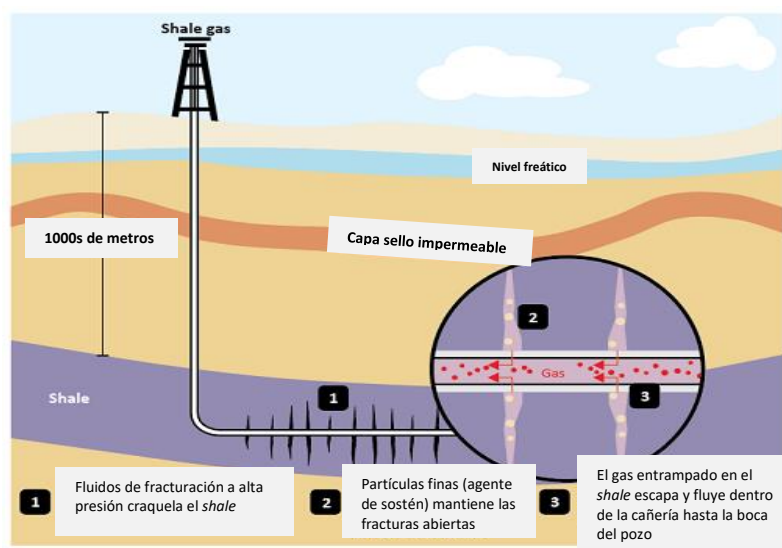


Figura 25. Esquema simplificado de las etapas involucradas en el proceso de fracturación hidráulica o fracking. 1) Inyección del fluido de fracturación a altas presiones y generación de fracturas; 2) detalle del apuntalamiento de las fracturas por los agentes de sostén inyectados en conjunto con los fluidos de fracturación; 3) migración del hidrocarburo entrampado a través de las fisuras o permeabilidad secundaria generada. Extraído de Ferrer Deheza & Montamat (2012).

Descrito este proceso, se puede responder al concepto previamente planteado sobre la importancia de las arenas en el proceso de fracturación. Las arenas silíceas, ya sea por su bajo costo o disponibilidad, es uno de los agentes de sostén más comúnmente empleado en la industria del *fracking*. Su presencia resulta fundamental en la mezcla de fluidos de fracturación ya que no solo colabora en la generación de fisuras cuando éste es inyectado a presión, sino que además cumple un rol fundamental en el sostenimiento. Cabe mencionar que este apuntalamiento tiene efecto no sólo durante o después de terminada la operación propiamente dicha, sino que se mantiene por largos períodos de tiempo en los que el sondaje continúa en producción. Las características físicas y químicas de estas arenas, son fundamentales además para generar una adecuada porosidad, permeabilidad y consecuentemente, una óptima conductividad de los fluidos, inicialmente entrampados en la formación.

En síntesis, las arenas, como cualquiera de los otros tipos de agentes de sostén, son insumos críticos a la hora de determinar el éxito de la fracturación y consecuentemente, la efectividad en la producción del pozo tratado (Peñarada, 2014).

4.2.d. Agentes de sostén

Aunque aquí sólo se tratarán las arenas silíceas, existen en el mercado una gran variedad de *proppants*, comúnmente llamados agentes de sostén. Estos agentes deben cumplir ciertas características críticas para asegurar su correcto funcionamiento en el sostenimiento de las fracturas, entre las que se encuentran propiedades de alta resistencia a la presión, efectos de diagénesis, redondez y esfericidad, granulometría controlada, alta conductividad y el menor costo posible (Giglio, 2018).

El mercado ofrece agentes de sostén de diversa composición, forma y tamaños, cada uno de ellos aptos para usos bajo determinadas condiciones. Básicamente se pueden dividir en cuatro grandes grupos: **arenas naturales**, en las que se incluye a las arenas silíceas; **agentes de sostén modificados**, los cuales incluyen a las arenas u otros agentes resinados (*RCS - Resin Coated Sand* y *RCP – Resin Coated Proppants*); agentes de sostén **artificiales**, como cerámicos o bauxitas; y otros agentes de sostén **especiales** (Fig. 26).

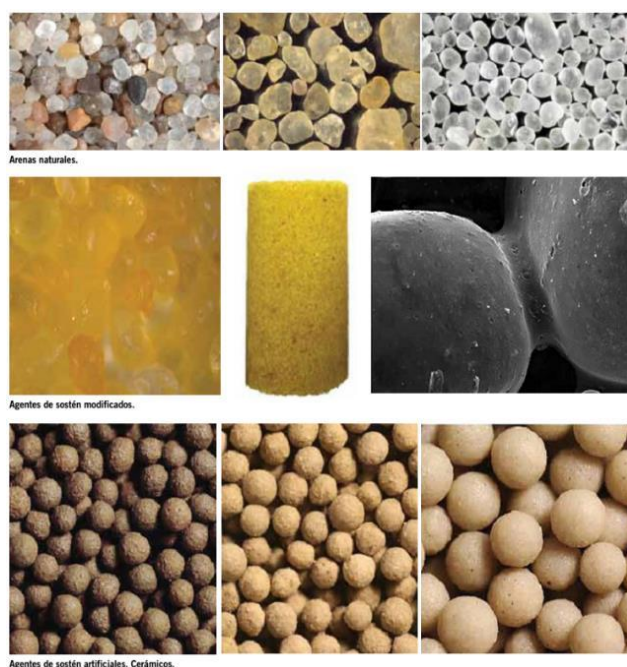


Figura 26. Ejemplo de alguno de los tipos de agentes de sostén disponibles en el mercado. Arriba, arenas naturales silíceas; centro, arenas modificadas recubiertas por una película de resina; abajo, agentes artificiales tales como los cerámicos. Extraído de Giglio (2018).

-Arenas naturales: un informe presentado por Peñarada (2014), las describe como el tipo de agente convencional, pionero y de mayor uso en la industria del petróleo. Se trata de arenas naturales de composición predominantemente silícea, exentas de otros minerales e impurezas, con buena selección y óptimas características de esfericidad y redondez en sus granos. Si bien se trata del agente de sostén más económico disponible en la industria de la fracturación, presenta algunas desventajas respecto a otros materiales, tales como poca uniformidad en sus tamaños y formas. A su vez, tienden a quebrarse a altas presiones, generando material fino que podría tapar los poros y disminuir la conductividad de los hidrocarburos a lo largo de las fracturas. En relación con esto último, las arenas naturales suelen emplearse cuando el esfuerzo al cierre que sufren las fracturas es menor a las 6.000 psi.

- Agentes de sostén modificados: se trata de agentes como las arenas naturales o cerámicos, que son recubiertos por una película de resina, tratamiento que, por varios motivos, mejora la calidad. Por un lado, se mejora la distribución de los esfuerzos sobre los granos, reduciendo los puntos de cargas e incrementando la resistencia a la compresión general del empaque. Así mismo, cuando los granos sufren rotura por compresión, las partículas finas generadas quedan encapsuladas dentro de la cubierta de resina, evitando que los canales se tapen y por lo tanto, no se vea afectada la conductividad (Ferrer Deheza y Montamat, 2012).

El resinado o la película de resina que recubre al propanante suele representar el 1.5% al 4.5% del volumen de la partícula. Si bien las calidades de resina son muy variables, en cualquiera de los casos puede lograrse que la calidad general del agente de sostén pueda mejorarse y al mismo tiempo, puede competir técnicamente con los propanantes sintéticos, a un precio relativamente menor.

Estos insumos presentan formas y tamaños irregulares, aunque mejorada respecto a las arenas naturales. En cuanto a la resistencia a la compresión, suelen utilizarse como alternativa a los agentes de sostén intermedios ya que, dependiendo de la calidad de la resina pueden soportar presiones de cierre menores a 8.000 psi (Fig. 28). Incluso para presiones mayores a los 4.000 psi, pueden resultar más efectivas que las arenas naturales, dado que presentan mejor conductividad.

- Agentes de sostén artificiales: se trata de materiales fabricados en forma artificial, en base a materia prima como el caolín o materiales con alto contenido en alúmina. Los principales ejemplos son los agentes de sostén cerámicos y bauxitas sintéticas, respectivamente, aunque también existen productos en base a silicato de magnesio o mezclas de bauxita y caolín.

Este tipo de materiales propanantes son sometidos a hornos de muy altas temperaturas. Dicho proceso permite obtener partículas de tamaños específicos, con un muy bajo contenido de agua, mejorando la estructura molecular del material (Braga *et al*, 2017). Como consecuencia se obtiene un producto con excelente esfericidad, partículas uniformemente densas, con una alta capacidad de conductividad, así como una considerablemente alta resistencia a la compresión.

Estos materiales se clasifican a su vez en función a sus densidades en, cerámicos de ultra baja densidad (o ULWC, por sus siglas en inglés *Ultra Light Weight Ceramic*); de baja densidad (LWC – *Light Weight Ceramic*), como los cerámicos a base de caolín; IDC (*Intermediate Density Ceramic*), generalmente relacionados con las bauxitas sintéticas; HDC (*High Density Ceramic*), asociados a bauxitas sintéticas con alto contenido de corindón; y finalmente, UHSP (*Ultra High Strength Proppant*). La materia prima con la que son fabricados los mismos y su composición química final, se ve detallada en la Tabla 17.

Tabla 17. Tipos de agentes de sostén sintéticos y detalles de la composición de cada uno de ellos. Extraído de Almeida Braga et al (2017), Fuente: Carbo Ceramics apud O'Driscoll (2013).

Propiedades		LWC (Cerámicos de Baja Densidad)	IDC (Cerámicos de Intermedia Densidad)	HDC (Cerámicos de Alta Densidad)
Materia Prima		Caolín	Bauxita	Bauxita
Densidad		2.71	3.27	3.56
Contenido	Alúmina (%)	51	72	83
	Sílice (%)	45	13	5
	Hierro (%)	1	10	7
	Titanio (%)	2	4	3.5

Las presiones de cierres que estos insumos pueden soportar dependen de su composición y densidades. Generalmente los agentes cerámicos intermedios, de baja a media densidad, son empleados en pozos sometidos a esfuerzos entre los 5.000 psi y 10.000 psi, mientras que aquellos de alta densidad serán empleados para presiones por encima de las 10.000 psi y hasta las 15.000 psi.

A pesar de sus ventajas en cuanto a propiedades físicas, los agentes sintéticos tienen un costo muy alto, por lo que su uso se ve restringido a determinadas condiciones, como por ejemplo en pozos de muy baja permeabilidad o muy profundos. Así mismo, las altas densidades, de 3.6 g/cm³ para el caso de la bauxita de 2.9 g/cm³ para la cerámica, requiere que los fluidos encargados de su acarreo presenten mayor potencia, caudal y presión, dificultando y encareciendo las operaciones.

- Agentes de sostén especiales: en esta categoría se incluyen a una serie de agentes con muy bajo uso y para aplicaciones muy particulares. Comprende también a *proppants* con diseños especiales para determinados tipos de ordenamiento y apuntalamiento de fracturas, fabricados con geometrías cilíndricas u angulares.

Otros tipos de agentes especiales mencionados por Giglio (2018), son aquellos utilizados para el estudio e interpretación de la geometría de las fracturas. Se trata de propanantes cerámicos o resinados que incorporan elementos radiactivos en su composición, capaces de emitir rayos gamma, los cuales permiten su detección dentro de la fractura. Otro tipo de materiales incorporados en la composición son los HTNCC (*High Thermal Neutron Capture Compound*), los cuales no son radiactivos, pero, al ser bombardeados con neutrones, elevan su energía pudiendo ser detectados por herramientas especiales de perfilaje.

Otros agentes especiales incluyen propanantes con productos químicos varios que, una vez ubicados en la fractura, son liberados y actúan como inhibidores de incrustaciones, ruptores, parafinas, asfaltenos, etcétera.

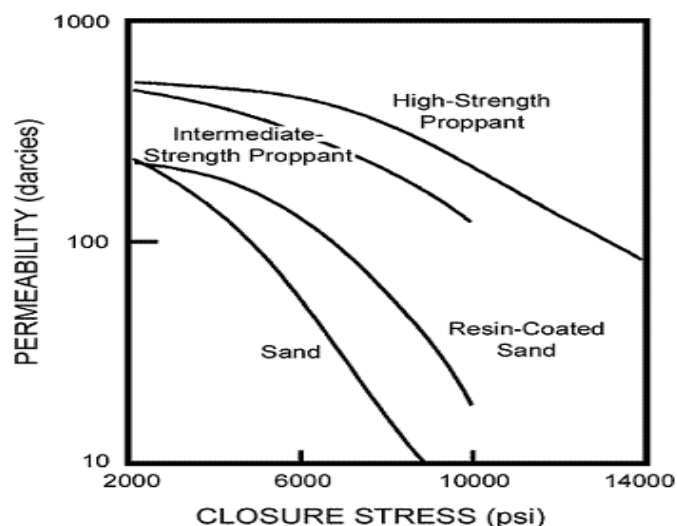


Figura 26. Comparación entre las resistencias a las presiones de cierre que soporta cada grupo de agentes de sostén, expresados en psi.

Existen además tecnologías compuestas, también denominados agentes de sostén autosustentables. Estos consisten en agentes impregnados con ciertos químicos que liberan oxígeno gradualmente, generando burbujas que rodean al grano y que, por lo tanto, les permite “flotar” dentro del fluido de fractura. En el análisis presentado por Giglio (2018) sobre la actualidad de los agentes de sostén, se resume que la elección de los insumos se basa en el concepto “costo-beneficio”. Dado que los procesos de terminación de un pozo son de los más costosos dentro del conjunto de las operaciones, generalmente se busca disminuir los precios de la estimulación en base a los agentes de sostén. Es por ello por lo que la demanda se basa en el uso de arenas síliceas naturales, cuyos costos son los más bajos del mercado. El uso de materiales sintéticos, como los cerámicos, es considerablemente menor y, por lo general, se hace puntualmente para reservorios que exijan altos valores de resistencia.

Finalmente, en cuanto a los modificados o resinados, el uso es acotado, en un porcentaje no mayor al 2% ó 3%, y cuyo fin se basa en reducir o eliminar los problemas de retorno de *proppant* o la generación de material fino por rotura de granos. Cabe mencionar además que una de las limitaciones que hace reducido el uso de estos materiales es que pueden afectar al desempeño del fluido de fracturación o, a la inversa, que el fluido puede dañar la película de resina.

4.2.e. Características y especificaciones técnicas de las arenas de fracturación

En general, arenas aptas para las operaciones de *fracking* suelen ser arenas con un alto contenido de cuarzo en su composición, lo que le otorga una gravedad específica de 2.65 g/cm³. El predominio de la sílice asegura la resistencia frente a los ácidos que pueda contener el fluido de perforación, así como una considerable resistencia mecánica a la compresión tras los efectos de las altas presiones, tanto de fluidos como litostáticas. Así mismo, deben presentar buena selección y una óptima esfericidad y redondez. La Figura 27 muestra la pirámide con los principales tipos de agentes de sostén, con sus respectivas cualidades en cuanto a uniformidad en los tamaños, forma, resistencia a la compresión, conductividad y costos. Estas características permiten que tengan la conductividad suficiente dentro de la fractura y puedan soportar tensiones de cierre de hasta 6.000 psi (Fig. 28).

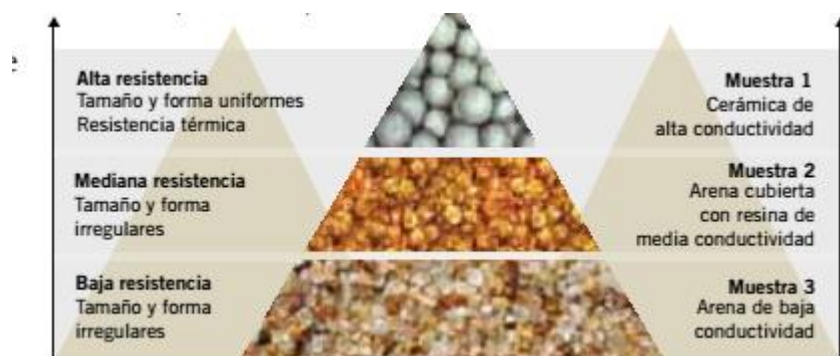


Figura 27. Pirámide mostrando los principales tipos de agentes de sostén, con sus respectivas cualidades en cuanto a uniformidad en los tamaños, forma, resistencia a la compresión, conductividad y costos. Extraído d'Huteau (2012).

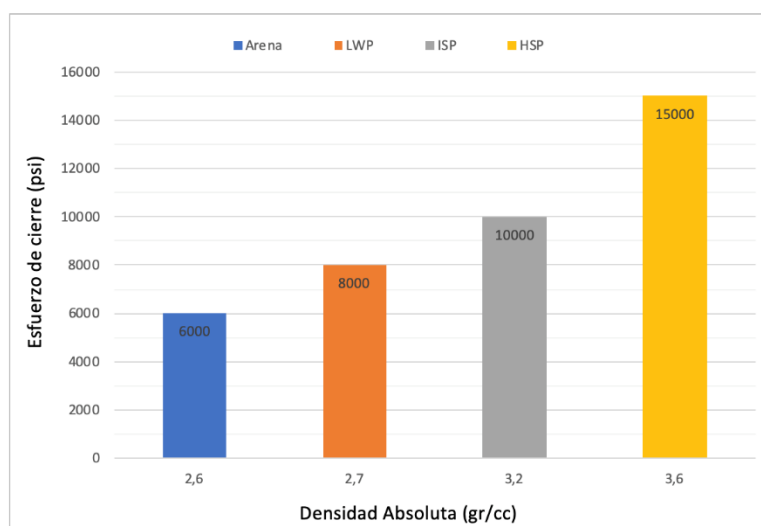


Figura 28. Tipos de agentes de sostén: detalle las densidades absolutas en g/cm^3 y la resistencia a la presión de cierre en psi. Sand (arenas silíceas naturales); LWP (Low Weight Proppants); ISP (Intermediate Strength Proppants); HSP (High Strength Proppants).

Sin embargo, estas no son las únicas condiciones que deben cumplir. Las arenas naturales utilizadas en el proceso de fracturación hidráulica presentan especificaciones bastante estrictas para poder ingresar en el mercado de los hidrocarburos. Para alcanzarlas, deben ser inicialmente procesadas en forma adecuada en plantas de tratamiento. En las mismas pasan una primera etapa de procesos húmedos, los cuales implican el lavado y clasificación de las arenas, para posteriormente continuar en una fase seca, etapa en la cual son secadas y luego clasificadas según el tamaño requerido por el mercado (AMP, 2017).

Previo a ingresar al mercado, la calidad y parámetros fisicoquímicos de estas arenas deben ser rigurosamente testeados. Los mismos incluyen características asociadas a la granulometría, redondez y esfericidad, turbidez, densidad *bulk* aparente y absoluta, resistencia a la rotura, solubilidad ácida y pérdida por ignición, todas ellas testeadas a través de ensayos de laboratorio. Estas especificaciones se encuentran regidas por una serie de Prácticas Recomendadas que la industria del petróleo decide adoptar en forma voluntaria. Estas normas

son las propuestas por el API (*American Petroleum Institute*) o sus equivalentes, las normas ISO (*International Organization for Standardization*), sobre las que se detallará a continuación.

4.2.f. Normativas y certificaciones

La industria petrolera en general, así como los servicios e insumos involucrados en la misma, se desarrollan dentro de un marco regulatorio tanto nacional como provincial, este último adaptado a las condiciones geográficas de cada lugar. Estas regulaciones implican tanto normas de seguridad como del cuidado de la salud y medio ambiente (YPF, 2013).

Así mismo existen otras normas que son propias de esta industria y que se implementan en forma internacional. Una de ellas son las normas API (*American Petroleum Institute*), las cuales proporcionan documentación específica que sirve como guía para las buenas prácticas en todo lo que concierne a la industria del petróleo y gas natural, tanto en su etapa exploratoria como productiva. Las mismas se encuentran aprobadas por el ANSI (*American National Standards Institute*), quienes presentan una larga trayectoria en la elaboración de normas técnicas, prácticas, así como documentos de orientación para las diversas operaciones petrolíferas y gasíferas. Otras normativas implementadas, equivalentes a las API, son las ISO (*International Organization for Standardization*). En cualquiera de los casos, lo que se busca con estos procedimientos es evaluar la calidad del agente de sostén. Esto se logra mediante la comparación de las características físicas de varios propanantes ensayados bajo iguales condiciones de laboratorio predeterminadas, y su posterior selección acorde a los requerimientos de la operación (Peñarada, 2014).

Las normas API son las empleadas para la determinación de los estándares de calidad de los materiales usados como agentes de sostén. Inicialmente, las Prácticas Recomendadas empleadas eran las normas API RP 56, 58 y 60, en los ensayos de arenas, gravas de empaque y agentes de sostén de alta resistencia usados en fracturación hidráulica, respectivamente. Actualmente, éstas han quedado obsoletas y han sido reemplazadas por la Práctica Recomendada ANSI/API 19C, cuya primera edición fue realizada en el año 2008. La misma trata sobre la medición de propiedades de los agentes de sostén para operaciones de fracturación, pero haciéndose extensiva también al *Gravel Packing*. No sólo determina cuáles son los parámetros físicos y químicos que los agentes en sus diversos tipos deben cumplir, sino también los procedimientos estándares para sus respectivos ensayos. Su equivalente es la Práctica Recomendada ISO 13503-2:2006, la cual incluye a los fluidos y materiales para la terminación de pozos.

Generalmente, los estudios de calidad suelen complementarse con la norma API RP 61, la cual permite hacer una evaluación a corto plazo sobre la conductividad de la fractura creada bajo condiciones de presión de confinamiento. Así mismo existe una evaluación a largo plazo, determinada por las Prácticas Recomendadas API 19D, o su equivalente ISO 13503/5 (Peñarada, 2014).

4.2.g. Especificaciones técnicas

a) Granulometría:

La granulometría o tamaño de las partículas tiene que ver con una determinación de las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano que existen en un determinado volumen de muestra y es función de los tamaños de apertura de las mallas de tamices. La importancia de este parámetro está relacionada con las características de permeabilidad y capacidad de flujo, directamente influenciadas por el tamaño de poro que se logre generar con el empaque. De igual forma, conocer la distribución granulométrica es crucial ya que, dos arenas de igual malla, pero diferente distribución de tamaño de partículas puede dar resultados muy diferentes en cuanto a la resistencia a la tensión de cierre.

Para la clasificación granulométrica se trabaja con la norma internacional ASTM E1181, la cual establece el empleo de una serie de tamices estandarizados cuyos tamaños de malla se pueden observar en la Tabla 18.

En general la norma contempla la utilización de una columna con un total de 8 tamices ASTM, denominados en forma estándar como 4, 6, 8, 12, 16, 20, 30 y 50. Esta misma normativa exige que al realizar el ensayo granulométrico, el 90% de las partículas sea retenido en los 6 tamices que conforman la parte central de la columna, permitiendo que sólo un 0.1% de partículas quede retenida en el tamiz superior y un máximo de 1% pase a través del inferior.

Tabla 18. Tabla comparativa con las 8 granulometrías más comunes de arenas silíceas usadas para la fracturación hidráulica, y su correlación con el número de tamices estandarizados por el ASTM. Detalle de las equivalencias en mm; porcentajes máximos y mínimos de retención de partículas y pasantes exigidos por la norma. Modificado de Advanced Mineral Processing S.L. (2017).

Designación	MALLAS ASTM-mm								
FRAC-SAND	6/12	8/16	12/20	16/30	20/40	30/50	40/70	70//140	
TAMICES ASTM necesarios para el ensayo granulométrico	3.36/1.69	2.38/1.19	1.68/0.84	1.19/0.60	0.84/0.42	0.60/0.30	0.42/0.21	0.21/0.10	
	4	6	8	12	16	20	30	50	Max 0.1%
	6	8	10	16	20	30	40	70	
	8	10	12	20	30	40	50	100	
	10	12	16	25	35	45	60	120	90%
	12	16	20	30	40	50	70	140	
	16	20	30	40	50	70	100	200	
	BANDEJA	BANDEJA	BANDEJA	BANDEJA	BANDEJA	BANDEJA	BANDEJA	BANDEJA	Max 1%

Tal como se ve en la Tabla 19, las nomenclaturas de las mallas suelen darse de a pares, por ejemplo “6/12”, lo que significa que las arenas pasan por el tamiz de 6 hilos por pulgada (3.36mm) pero es retenido en el de 12 hilos por pulgada (1.69mm). En general, los tamaños de arenas más demandadas por la industria son las de malla entre 20/40 y 12/20. En la Tabla 19 se mencionan los principales tipos de arenas utilizadas para fracturación clasificada según su malla.

Tabla 19. Tamaños más comunes de arenas empleadas en fracturación.

Sistema métrico (mm)	Tamaño de malla US
2360 x 1180	8 x 16
1700 x 0.850	12 x 20
1180 x 0.600	16 x 30
0.850 x 0.425	20 x 40
0.600 x 0.300	30 x 50
0.425 x 0.212	40 x 70

Algunos trabajos, explican que durante la fracturación hidráulica se busca tener una óptima conductividad mediante la generación de fracturas de poco ancho pero interconectadas en diversas direcciones y, como estadio final, generar un canal de dimensiones mayores que conecte con el pozo. Para ello se prefiere iniciar la estimulación con arenas de granulometrías finas para aumentarlas gradualmente hacia mallas mayores en las etapas finales.

b) Forma de las partículas:

Este parámetro hace hincapié en dos características de los granos, **esfericidad** de las partículas y **redondez** de sus aristas. Estos índices se determinan de forma visual comparándolos con el diagrama de Krumbein y Sloss (1951) de la Fig. 19. La esfericidad es un parámetro relacionado con el grado de acercamiento de una partícula a la forma esférica, mientras que la redondez se encuentra relacionada con la rugosidad relativa de la superficie o aristas de esta. Cualquiera sea el caso, ambas características tienen una fuerte y directa influencia en la calidad y resistencia del agente de sostén, así como en la conductividad del flujo. Peñarada (2014), destaca a su vez, la importancia del conocimiento de la forma de los granos de arena ya que puede generar ciertos efectos de incrustación en las fracturas. Las prácticas seguidas en la industria del petróleo establecen que los valores, para ambos parámetros, deben ser mayores a 0.6 (Fig. 29), lo cual implica preferentemente arenas con granos esféricos, de subredondeados a muy redondeados. Asimismo, en caso de que se observen aglomerados, su presencia no debe ser mayor al 1% de la muestra.

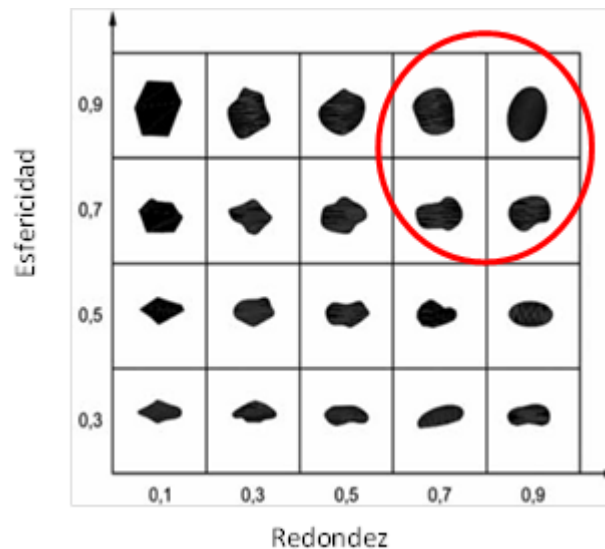


Figura 29. Diagrama de esfericidad y redondez de Krumbein y Sloss (1951). En rojo, los valores de esfericidad y redondez requeridos para las arenas síliceas empleadas en la fracturación hidráulica.

c) Densidad:

La determinación de la densidad es de gran importancia al evaluar el volumen que ocupa un agente dentro de la fractura y la porosidad lograda en la misma.

Por un lado, tanto la **densidad aparente** como la **densidad bulk** se encuentran directamente relacionada con el peso de un material dividido el volumen total que éste ocupa. Para el caso de un agente de sostén, incluirá a la masa del agente propiamente dicho más el volumen poral. Su cálculo es necesario a la hora de determinar la cantidad de propanante necesario para rellenar una fractura, así como lugares de almacenamiento, tales como silos.

Por su parte, la **densidad absoluta** hace referencia a la masa de cualquier sustancia por unidad de volumen, es decir que determinará la densidad del grano o agente de sostén propiamente dicho, excluyendo tanto a los poros como a los espacios vacíos entre granos.

d) Resistencia a la rotura:

Este parámetro se encuentra relacionado con la resistencia que presenta un agente de sostén al ser sometido a determinadas condiciones de confinamiento. La importancia de esta especificación es la evaluación de la rotura del material para evitar la generación de partículas de menor tamaño o de finos ante la aplicación de esfuerzos y su comparación respecto a otros tipos de agentes de sostén.

Si bien la resistencia a la rotura dependerá de características tales como la geometría y granulometría de la arena, la superficie de contacto y el esfuerzo que se aplique, las normas actualmente en vigencia exigen que cualquiera sea la presión ensayada, el porcentaje de rotura del agente de sostén no debe superar el 10%. En relación con dicho porcentaje, comúnmente se calcula un coeficiente denominado "K", el cual determina las presiones en las que la arena genera menos del 10% de finos.

En forma generalizada y, en función a lo expuesto en la Tabla 20, cabe destacar que la resistencia a la rotura de los granos de arenas suele ser inversamente proporcional al tamaño

de las partículas. Esto se debe a que cuanto menor sea la malla de las arenas, menor será la porosidad y, por lo tanto, el área de contacto disponible para soportar la presión será mayor.

Tabla 20. Tabla comparativa con las presiones capaces de soportar las arenas en función a su tamaño de tamiz o malla. Extraído de AMP (2017).

RESISTENCIA A LA ROTURA						
TAMAÑO ARENA		CARGA EN LA CELDA		PRESIÓN		Máximo contenido sugerido de finos (% en peso)
ASTM	mm	lb	kN	PSI	MPa	
6/12	1.68/3.36	6.283	28	2000	14	20
8/16	1.19/2.38	6.283	28	2000	14	18
12/20	0.84/1.68	9.425	42	3000	21	16
16/30	0.60/1.19	9.425	42	3000	21	14
20/40	0.84/0.42	12.566	56	4000	28	14
30/50	0.30/0.60	12.566	56	4000	28	10
40/70	0.21/0.42	15.708	70	5000	35	8
70/140	0.10/0.21	15.708	70	5000	35	6

d) Contenido de arcillas e inorgánicos

Este parámetro se basa en el contenido de elementos varios, tales como arcillas u otras partículas inorgánicas, que puedan quedar en suspensión. Su evaluación es de gran importancia para determinar si las arenas usadas como agentes de sostén pueden generar residuos que afecten a la porosidad y permeabilidad dentro de las propias fracturas.

Dicha propiedad es medida en unidades FTU (*Formazin Turbidity Unit*) y/o NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*) y las prácticas recomendadas determina que los agentes de sostén no pueden superar el valor de 250 FTU (NTU).

e) Resistencia a los ácidos

Se relaciona con el contenido en las arenas de elementos solubles en ácidos, como carbonatos, arcillas, óxidos, feldespatos, entre otros. Estos elementos podrían ser fácilmente disueltos durante una posible acidificación del fluido de fracturación que acompaña al agente de sostén. Esta posible disolución parcial de elementos podría contribuir a la reducción de los espacios porales de la fractura o afectar directamente la conductividad de esta.

En la Tabla 21 se muestra la máxima solubilidad recomendada en función del tamaño de tamiz o malla. En la misma es posible observar que el máximo de elementos solubles es del 2% para las granulometrías gruesas, mientras que para las más finas es aceptable hasta un 3%.

Tabla 21. Máximas solubilidades a los ácidos recomendadas para las arenas según su malla. Extraído de AMP (2017).

MÁXIMA SOLUBILIDAD RECOMENDADA A LOS ÁCIDOS		
TAMAÑO ARENA		MÁXIMA SOLUBILIDAD
ASTM	mm	(% en peso)
6/12 a 30/50	1.68/3.36 a 0.30/0.60	2
40/70 a 70/140	0.21/0.42 a 0.10/0.21	3

Según un informe publicado por el Ministerio de Energía y Minería de la Nación en el año 2017, sobre el mercado del cuarzo, de todas las especificaciones requeridas para las arenas de fracturación, la primera a evaluar es la resistencia a la compresión que las mismas pueden soportar, seguidas del tamaño de malla, considerando que ambos parámetros son inversamente proporcionales. Como consecuencia de ambos parámetros, el API clasifica los agentes de sostén en cinco categorías principales, expuestas en la Tabla 22.

Tabla 22. Clasificación de arenas de fracturación propuesta por API RP 56, según los rangos de resistencia. Las arenas clases C contienen feldespato en su composición; las clases D y E difieren, además de la resistencia a la compresión, en el grado de redondez y solubilidad ácida.

Arena de fracturación	Rango de presión (psi)
Arena Clase C	0-4.000
Arena Clase D	0-5.000
Arena Clase E	2.000-6.600
Arena de Superficie modificada (resina)	4.000-12.000
Cerámicas	10.000-16.000

En dicho informe se menciona que las arenas más permeables y con mayores resistencias a altas tensiones de cierre de pozo son las arenas limpias, con bajo contenido en materiales “blandos” y con mayor redondez en sus granos. Además, describe que, bajo mismas condiciones de presión, las arenas de mallas más grandes serán más permeables que las de mallas menores. Cabe recordar que la composición silícea de las arenas es fundamental para resistir los posibles ataques químicos en los ambientes corrosivos que pueden darse dentro de los pozos.

4.2.h. Análisis, ensayos y equipamiento

a) Tamizado

Este análisis permite determinar uno de los primeros parámetros descritos en el apartado anterior, la granulometría. Para ello los equipos utilizados son tamizadoras de laboratorio de tipo *Ro-Tap* (Fig. 30), las cuales trabajan con una columna de 7 tamices, todos ellos estandarizados según ASTM E11 e ISO 3310-1. Dicho equipo trabaja con movimientos tanto circulares horizontales como con golpeteos verticales, lo cual permite simular un tamizado manual, pero en forma mecánica, consistente y repetible. Asimismo, se requerirá del uso de balanzas de precisión (al menos de 0.1g) y de pinceles de nylon o similares para la correspondiente limpieza de los tamices (Peñarada, 2014).



Figura 30. Tamizadora de laboratorio de tipo Ro-Tap, empleada para el análisis granulométrico de los agentes de sostén.

El procedimiento consiste en armar la columna de tamices de arriba hacia abajo en forma decreciente, según los tamaños de orificios, colocando un fondo o bandeja a modo de depósito y una tapa en la parte superior. En la Tabla 18, anteriormente descrita, es posible ver el orden que los mismos deben llevar, en función a la malla que se quiera analizar. Previo al armado de la columna es necesario que los tamices se pesen en forma individual y que su masa quede registrada.

La preparación de la muestra implica el cuarteo de ésta hasta obtener una cantidad de entre 100 y 120 gr, para luego ser vertida sobre el tamiz superior. El proceso de tamizado se suele realizar durante unos 10 minutos.

Una vez finalizado, se retiran los tamices y se pesa en forma individual el contenido de muestra de cada uno de ellos, incluyendo lo acumulado en la bandeja del fondo. En función al peso de cada tamiz, se debe calcular un porcentaje individual mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje (\%)} = \frac{\text{Peso Total del Tamiz}}{\text{Peso Total de la muestra}} \times 100$$

Las consideraciones a tener en cuenta son que como mínimo, el 90% de la muestra analizada debe pasar la malla más gruesa y quedar retenido en la columna de tamices centrales. Si por ejemplo, la muestra a analizar debe ser de malla 16/30, el 90% de la misma debe pasar el tamiz 16 pero quedar retenido antes del tamiz 30. Además, el ensayo no debe retener más del 0.1% de la muestra en el tamiz superior, mientras que, en el tamiz de fondo o bandeja, no puede quedar acumulado más del 1% de la muestra. Finalmente cabe mencionar que la pérdida operativa durante el análisis no debe ser mayor al 0.2%. La misma se calcula como la diferencia entre la muestra total inicial y la sumatoria de cada peso de muestra individual por tamiz.

En lo que respecta a las calibraciones de los equipos, los mismos se encuentran estandarizados en los últimos apartados agregados en las normas ISO. De igual modo se hace hincapié en la certificación de los tamices utilizados y se recomiendan el cálculo de las diferencias de masas existentes entre la muestra inicial y la muestra final analizada, considerando los porcentajes de diferencia y desviación absoluta (Kaufman *et al*, 2007). Algunos trabajos consultados especifican que el equipo debe ser calibrado a una velocidad de 290 rpm, 156 golpes/min y una altura del golpeador de 33.4mm.

Finalmente, con los datos obtenidos durante el tamizado se construyen curvas granulométricas que permitirán analizar las distintas fracciones obtenidas. Se trata de curvas realizadas en escala logarítmica, donde se compara el porcentaje de material pasante en el eje de la ordenada versus la apertura de la malla del tamiz, en el eje de las abscisas (Fig. 31).

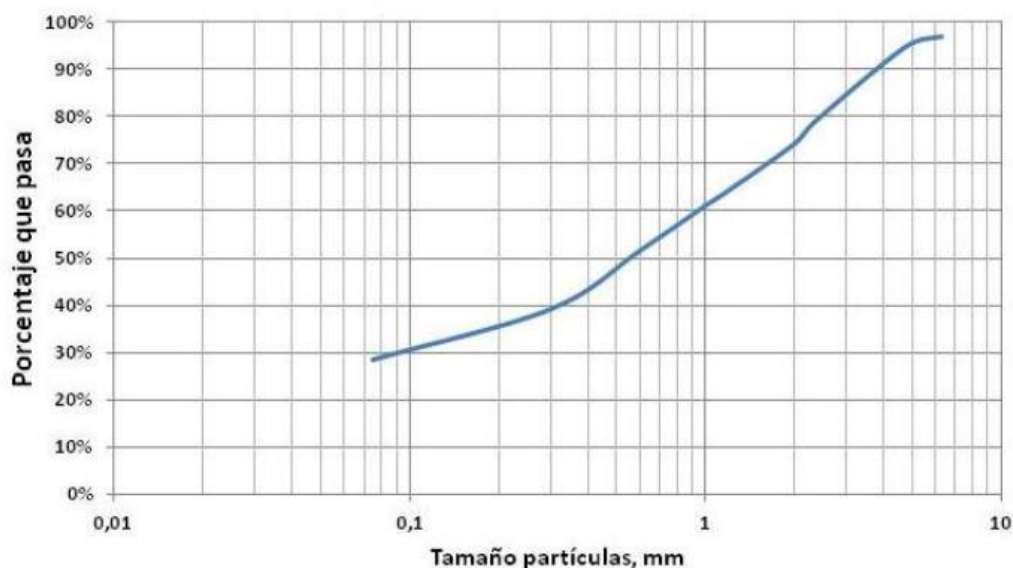


Figura 31. Ejemplo de una curva granulométrica. Extraída de Salgado Riquelme (2017).

b) Esfericidad y redondez:

El análisis de esfericidad y redondez consiste en un análisis simple, de tipo visual, que se realiza directamente mediante la observación de una cierta cantidad de granos con una lupa binocular. Esta metodología, a pesar de ser sencilla, resulta subjetiva y dependerá del observador encargado del análisis.

Para la misma, se debe separar una muestra muy pequeña, generalmente de 1 o 2 g de arena, previamente mezclada con un cuarteador, para que la misma sea homogénea y representativa. A continuación, se separa al azar una cantidad reducida de granos, por lo general unos 25 granos, los cuales se ordenan en forma de grilla, se enumeran y fotografían. La determinación de redondez y esfericidad se realiza visualmente en la lupa binocular y en forma comparativa con los patrones de clasificación preestablecidos por Krumbein y Sloss (1951).

Finalmente, se calcula una media aritmética con la totalidad de valores obtenidos de esfericidad y redondez para cada grano de arena (Fig. 32).

El equipamiento necesario para este análisis consiste en un cuarteador, una balanza de precisión de 0.001 g, ya que las muestras son muy reducidas, y una lupa binocular de 10 a 40X.

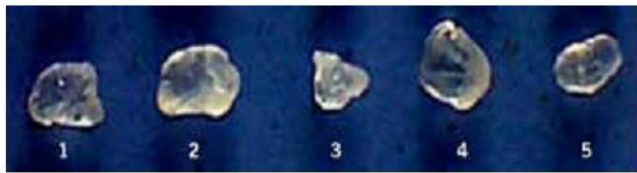
		
Nº	Redondez	Esfericidad
1	0,3	0,7
2	0,5	0,7
3	0,1	0,3
4	0,7	0,7
5	0,5	0,5
Promedio	0,42	0,58

Figura 32. Ejemplo de un análisis de esfericidad y redondez. Toma al azar de granos, enumeración y fotografiado de los mismos. Determinación de los parámetros por comparación visual con la tabla de Krumbein & Sloss (1951); cálculo de valor promedio. Ejemplo extraído de Peñarada (2014).

c) Densidad *bulk*, densidad aparente y absoluta:

Tal como se mencionó anteriormente estos parámetros permiten calcular el volumen que ocupa un agente dentro de la fractura y la porosidad lograda en la misma.

El ensayo de **densidad *bulk*** es realizado con equipos regulados por el ANSI (*American National Standards Institute*). Consisten básicamente en embudos con palancas en su parte inferior, que van liberando el material a analizar dentro de un cilindro calibrado. El cálculo de densidad es determinado en función del volumen conocido del cilindro y el peso medido del agente en cuestión.

La **densidad aparente**, es un parámetro que se determina mediante el uso de un fluido de baja viscosidad encargado de mojar las partículas, incluyendo al espacio poral. Las Prácticas Recomendadas API introducen la utilización de un aceite parafínico, kerosene o fluido similar, con una viscosidad máxima menor a 5 centipoise (Kaufman, 2017). Para este ensayo se emplea un picnómetro y muestras de aproximadamente 10g.

Finalmente, para medir la **densidad absoluta** o el volumen real de los granos, se emplea un porosímetro de gas basado en la Ley de Boyle. El gas recomendado para dicha práctica es el helio, aunque otras alternativas también aceptables son el nitrógeno o aire seco.

d) Resistencia a la rotura

Tal como se mencionó anteriormente, lo que se evalúa en este ensayo es el nivel máximo de estrés al que se puede someter el agente de sostén y el nivel al que los esfuerzos de confinamiento son excesivos al punto de generar roturas y partículas finas (Tabla 23).

El equipo empleado para dicho ensayo consiste en una prensa de tipo hidráulica. La muestra es inicialmente tamizada y colocada dentro de una celda de acero de aleación para ser sometida a una determinada presión. En las Prácticas Recomendadas de API, se han introducido recientemente algunas modificaciones en lo que respecta a los ensayos de resistencia (Kaufman, 2017). Las mismas involucran especificaciones en lo que respecta a los bastidores de carga hidráulica, calibraciones, requerimientos de la celda de trituración donde

es colocada la muestra, tamaño de los pistones, entre otras. Así mismo, se hace mención a la masa de sostén que debe emplearse en cada ensayo, dependiendo de la malla del mismo y densidad. En lo que respecta a las normas ISO 13503-2, las prácticas para este tipo de ensayo aún se encuentran en revisión.

Tabla 23. Ejemplo de la clasificación empleada en los ensayos de resistencia a la rotura, teniendo en cuenta el 10% de rotura del material (coeficiente "K"). Extraído de Peñarada (2014).

Clasificación al 10% de rotura	Presión	
	MPa	psi
1K	6.9	1.000
2K	13.8	2.000
3K	20.7	3.000
4K	27.6	4.000
5K	34.5	5.000
6K	41.4	6.000
7K	48.3	7.000
8K	55.2	8.000
9K	62.1	9.000
10K	68.9	10.000
11K	75.8	11.000
12K	82.7	12.000
13K	89.6	13.000
14K	96.5	14.000
15K	103.4	15.0000

e) Turbidez

Este ensayo consiste básicamente en la medición de las propiedades ópticas de una suspensión, como consecuencia de parámetros como la dispersión y absorción de la luz (Peñarada, 2014). Cuanto mayor sea el contenido de partículas blandas en las arenas, como arcillas u otros elementos inorgánicos, habrá más cantidad de elementos en suspensión y consecuentemente, mayor turbidez.

Como el primer paso a realizar durante este ensayo es agitar la muestra fuertemente, las Prácticas Recomendadas API, sugieren el uso de agitadores orbitales, como por ejemplo el *Wrist-Action®Shaker* (Fig. 32), con un seteo máximo de 10 por 30 $\pm$ 5s. De esta manera, los ensayos pueden ser reproducibles y evita las variaciones según el técnico u operario que realice el ensayo. Posteriormente, el equipo empleado para leer la turbidez generada es un turbidímetro correctamente calibrado y, API, nuevamente recomienda el uso del *Spectronic 20* (Fig.



A)



B)

Figura 33. Equipos empleados durante el ensayo de turbidez. A) Agitador Wrist-Action®Shaker; B) turbidímetro Spectronic 20, ambos sugeridos en las Prácticas Recomendadas API.

f) Solubilidad en ácido:

Según lo especificado por la normativa, este ensayo se realiza cuando el propanante puede llegar a entrar en contacto con ácidos. Para ello se recomienda el uso una solución de HCl:HF preparada en relación 12:3 es decir, un 12% de ácido clorhídrico y un 3% de ácido fluorhídrico. La Práctica Recomendada API 56 especifica el uso de la mencionada solución en proporciones 12:3 en arenas de fracturación, durante un período de 30 minutos y una temperatura de 150°F, aproximadamente 65.55°C (Kaufman, 2017). Las mismas características son adoptadas por la más reciente norma ISO 13503-2, que a su vez estandariza realizar dicho ensayo bajo condiciones estáticas.

Los equipos empleados en este ensayo incluyen una balanza de precisión de 0.001g y una serie de elementos de laboratorio tales como, vasos de precipitado de polietileno o polipropileno, con capacidades entre 150 a 200ml; probeta graduada o matraz aforado de polietileno o polipropileno y capacidad de 1000ml; horno con alcance de 105°C; baño de agua (66°C); equipo analítico de filtración resistente al ácido con tecnología de filtrado al vacío; y finalmente, papel filtro a base de celulosa.

g) Muestreo:

Al igual que en muchas otras industrias, el muestreo constituye un factor fundamental a la hora de asegurar la calidad de la materia prima a emplearse en las operaciones. En el caso particular de la fracturación hidráulica, las arenas silíceas conllevan toda una logística, a lo largo de la cual debe asegurarse un correcto muestreo y control de calidad en las diferentes etapas. Si dicho muestreo no se realiza en forma representativa en la totalidad del cargamento, resultará muy difícil de testear y correlacionar con las especificaciones técnicas y estándares informadas por el proveedor.

En forma generalizada las arenas pasan por tres etapas principales (Fig. 34), con determinadas particularidades dependiendo de la zona de consumo. La primera etapa está relacionada con la zona de minado, la cual involucra la extracción del material de las canteras, su posterior procesamiento y preparación, para ser enviadas a las instalaciones de carga o almacenamiento, ya sea en camiones o trenes.

Posteriormente las arenas pueden ser transportadas directamente a su destino final o descargadas y almacenadas en silos, en instalaciones intermedias para su posterior redistribución. En las mismas el almacenamiento suele hacerse en función del tamaño de las arenas, independientemente de la calidad u origen, por lo que la trazabilidad de los lotes se pierde en esta etapa. Finalmente, la materia prima es distribuida en camiones con tolvas o en bolsones a granel, hasta su locación final en los pozos a fracturar.



Figura 34. Esquema e imágenes de las etapas involucradas desde el minado de las arenas silíceas y almacenamiento en plantas de distribución hasta su transporte y/o almacenamiento final en la locación del pozo.

En todas y cada una de las etapas mencionadas anteriormente, es necesario realizar muestreos de la materia prima. Uno de los principales puntos para tener en cuenta a la hora del muestreo es que es muy poco probable que en campo se pueda replicar en forma exacta el método de muestreo realizado por el productor o proveedor de las arenas. Por ello es muy importante saber dónde y cómo se deben tomar las muestras y que la extracción de estas sea lo más representativa posible. Para ello es fundamental volver a cuartear y homogeneizar dichas muestras para evitar problemas derivados de la segregación durante el transporte y/o almacenamiento. Las partículas en movimiento tienden a separarse naturalmente según diferencias de tamaño, forma y/o masa, colocándose aquellas más finas en huecos o fondos, mientras que las más gruesas rebotan y ruedan, migrando hacia la parte superior (Fig. 35).



Figura 35. Ejemplos de segregación de partículas por tamaño durante procesos de transporte y/o almacenamiento, a la izquierda en pilas estáticas; derecha, en flujos de partículas en movimiento.

El muestreo de los agentes de sostén también se encuentra estandarizado según ISO y las Prácticas Recomendadas API. La diferencia entre ambas radica en la exigencia de que el muestreo se realice desde una fuente en movimiento, evitando dicha problemática de segregación (Kaufman *et al*, 2007).

Estas prácticas recomiendan que el muestreo sea realizado cuando el material se encuentre en movimiento desde o hacia las cintas transportadoras o líneas de tamizado en las plantas de procesamiento de arenas; en los contenedores a granel o bolsones en los que son cargados en los camiones; y en las cintas transportadoras empleadas en caso de que las arenas sean enviadas desde *mixers* o mezcladoras. No se recomienda la toma de muestras en pilas estáticas o silos, pero en caso de tener que hacerlo, se debe tener en cuenta la posible segregación de partículas según tamaño, tomando porciones de diferentes puntos de la pila y realizando un apropiado cuarteo y homogenización de las partículas.

En cuanto a la cantidad, se recomienda la extracción de un mínimo de una muestra cada 9000kg, o una fracción equivalente. Para el caso específico de materia prima transportada en contenedores, se recomienda extraer un mínimo de 3 muestras y un máximo de 10, posteriormente mezcladas o combinadas para su correcto análisis. En el caso de arenas almacenadas en bolsones de hasta 50kg, se recomienda extraer un mínimo de 4 y máximo de 10 muestras cada 20 bolsones, también mezcladas para su testeo.

Tanto las ISO como API, presentan especificaciones relacionadas al mecanismo de muestreo, entre lo que se menciona el uso de apropiados reductores de tamaño de muestra y cuarteadores para homogeneizar las mismas, así como también la utilización de muestreadores manuales o automáticos para la toma de muestras dentro de un flujo de partículas en movimiento (Fig. 36).



Figura 36. Ejemplos de separadores de muestras (*Sample Splitters*) estandarizados, empleados por ciertas compañías petroleras para la toma de muestras de arenas silíceas.

Otras de las prácticas mencionadas por las ISO 13503-2, incluyen el registro de todos los análisis realizados en cada cargamento durante el período de un año y el resguardo y almacenamiento de muestras físicas de no menos de 0.25kg, por un período mínimo de 6 meses.

4.2.i. Mercado, demanda de la materia prima y centros de consumo

Tal como se ha mencionado, la industria de las arenas silíceas tratada en el presente trabajo, apuntan a su uso para la industria petrolera en los procesos de fracturación hidráulica,

siendo la Formación Vaca Muerta el principal centro de consumo del país, con Añelo como la principal localidad consumidora de este insumo mineral.

Vaca Muerta como yacimiento no convencional presenta varias ventajas en cuanto a su explotación, lo cual la hace atractiva para el mercado en general. Por un lado, al encontrarse a más de 2500m de profundidad, se ubica muy por debajo de cualquier acuífero de agua dulce y contiene capas litológicas que constituyen barreras impermeables naturales, reduciendo significativamente los riesgos ambientales y los consecuentes conflictos sociales que los mismos pueden involucrar. A su vez, los yacimientos se encuentran alejados de zonas urbanas, pero dentro de una región con fuerte actividad de extracción de gas y petróleo desde hace años, lo cual facilita la logística de las operaciones dada la presencia de infraestructura e insumos próximos a los yacimientos. La figura 36 muestra la diferencia entre el yacimiento Vaca Muerta y los yacimientos de Pensilvania (EEUU).

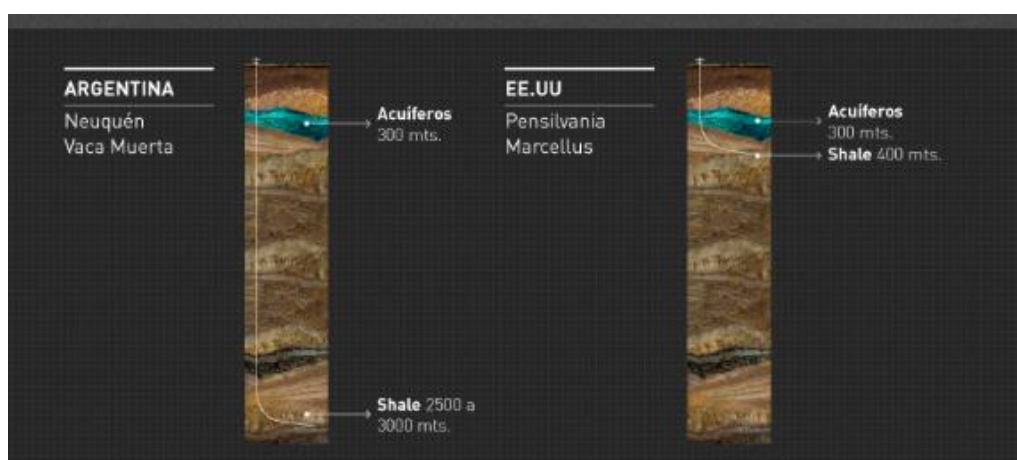


Figura 37. Diferencias entre los yacimientos de Formación Vaca Muerta y los yacimientos de Pensilvania (EEUU). Fuente: <https://www.ypf.com>

La mayoría de las fuentes consultadas coinciden en que el consumo de arenas silíceas para la fracturación en Vaca Muerta es de alrededor de 8000t por pozo. Teniendo en cuenta los datos presentados en apartados anteriores sobre la estructura del mercado nacional, se puede determinar que, a pesar de contar con importantes yacimientos de arenas silíceas de buena calidad y aptitud para uso en los procesos de fracturación, los volúmenes generados son deficitarios frente a la creciente demanda generada por Vaca Muerta. Ante este escenario, la Argentina no ha podido abandonar completamente el consumo de materia prima importada y la logística desarrollada se detalla a continuación.

Inicialmente, los principales cargamentos de materia prima e insumos provenientes de los Estados Unidos, ingresaban al país por el puerto de Buenos Aires. Sin embargo, en los últimos años, la creciente demanda de insumos por parte del yacimiento de Vaca Muerta, permitió que los buques de carga con capacidades de hasta 10.000t, comenzaran a ingresar a través del Puerto de Bahía Blanca, dada su mayor cercanía con la provincia de Neuquén y su consiguiente disminución de costos relacionados con el transporte terrestre. En esta localidad la materia prima almacenada en bolsones, es cargada en camiones tipo plancha para su posterior transporte a los pozos petroleros o a plantas de almacenamiento ubicadas en la localidad de Añelo, Provincia de Neuquén. En la actualidad muchas de estas plantas cuentan con silos de almacenamiento o cintas transportadoras que permiten la carga de las arenas

silíceas en camiones tipo tolvas, encargados de la redistribución final de la materia prima en las locaciones.

En el caso de la materia prima nacional, el principal transporte se hace vía terrestre (Fig. 38), tanto desde la provincia de Entre Ríos como de Chubut. En el caso de las arenas provenientes de Dolavon, el cargamento transportado en su totalidad en camiones hasta la provincia de Neuquén resulta en costos muy elevados, sumado a los inconvenientes generados en las rutas como consecuencia de los crecientes volúmenes de cargas transportadas (Tabla 24). Este escenario ha dado lugar al planteo de rutas alternativas, proponiéndose una evaluación del transporte de arenas en camiones hasta Puerto Madryn y su posterior continuidad vía marítima hasta el puerto de Bahía Blanca. En esta última localidad siguen en pie y con firme convicción la continuación de la obra del tren a Vaca Muerta (Fig. 39), el cual sería aprovechado no sólo para el transporte de arenas de hidro-fractura, sino también para otras materias primas como baritina y cemento, equipos e insumos varios.

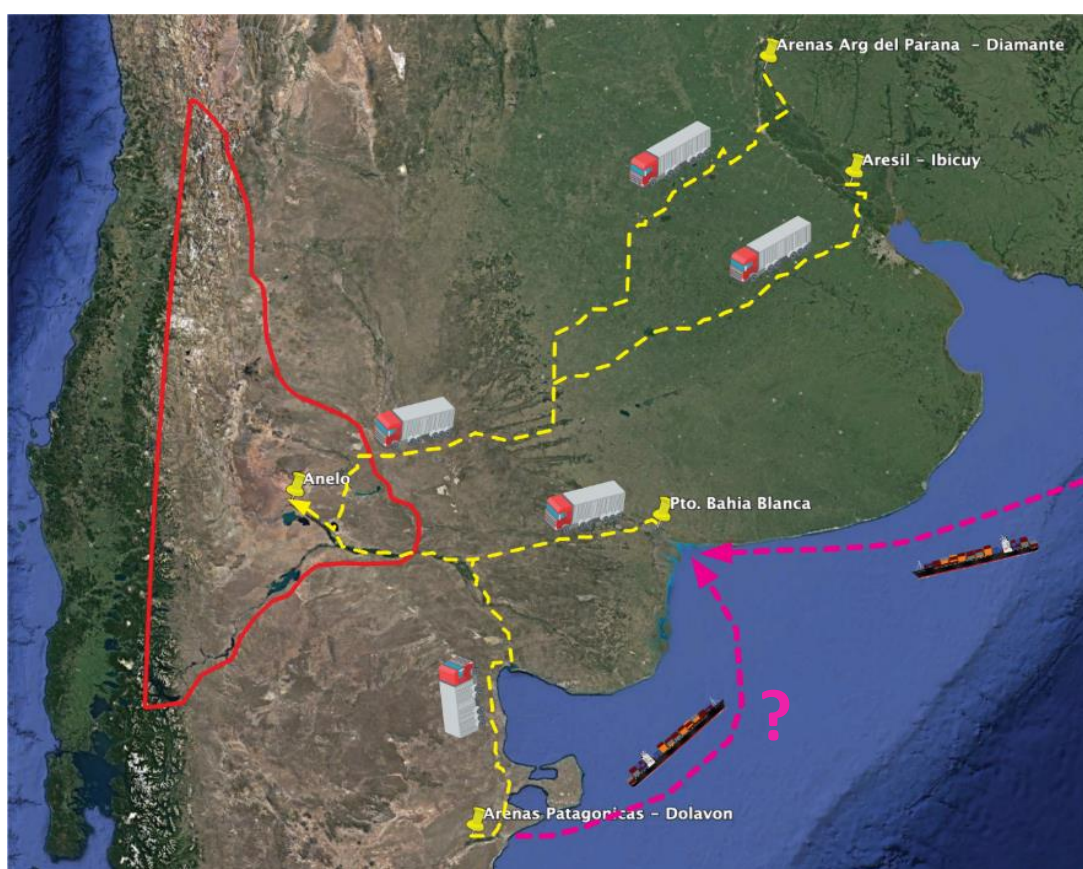


Figura 38. Esquema de las rutas de provisión de arenas silíceas desde sus yacimientos. En fucsia, rutas marítimas de ingreso de materias primas e insumos importados; en amarillo, rutas de transporte terrestre; en rojo, delimitación de la cuenta neuquina, productora de hidrocarburos no convencionales. Detalle de una posible nueva ruta alternativa marítima entre Puerto Madryn y Bahía Blanca.



Figura 39. Obra de renovación, mejoramiento y construcción de vías necesarias para la implementación del tren de carga que une el puerto de Bahía Blanca, principal receptor de insumos y equipos importados, con la localidad de Añelo, principal localidad involucrada con la explotación de Vaca Muerta. Fuente: Diario El Cronista (<https://www.cronista.com/economiapolitica/Vaca-Muerta-transfieren-predio-clave-para-la-reactivacion-del-Tren-Norpatagonico-20190724-0001.html>).

Tabla 24. Distancias terrestres de los principales trayectos involucrados en el transporte de las arenas silíceas.

Tramos	Distancias (Km)
Bahía Blanca – Añelo	622
Dolavon – Añelo	855
Ibicuy – Añelo	1269
Diamante – Añelo	1336

5. PROPUESTA DE INSTALACIÓN DE UN LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIA PRIMA PARA LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y OTRAS. EVALUACIÓN DE PROYECTO

5.1 Generalidades y objetivos del proyecto

Teniendo en cuenta el creciente flujo de actividad relacionada con la producción de hidrocarburos no convencionales de la Formación Vaca Muerta, el proyecto pretende facilitar y dar soporte a algunas de las principales problemáticas que pueden presentar arenas silíceas como materia prima empleadas. Estos minerales resultan claves a la hora del éxito o fracaso de las operaciones de fracturación hidráulica, pudiendo generar cuantiosos gastos innecesarios si no se realizan previamente los correspondientes controles de calidad. Las Prácticas Recomendadas API o los estándares ISO, proponen la realización de estos controles de modo tal que permita mantener una trazabilidad de los lotes, desde sus lugares de orígenes hasta su destino de uso final.

El proyecto a evaluar consiste en la puesta en marcha de un laboratorio de servicios de índole geológico, que permita llevar a cabo muestreos y ensayos enfocados en la determinación de las especificaciones técnicas y calidad de las arenas silíceas demandadas por la industria petrolera, haciendo hincapié en los ensayos más simples tales como los granulométricos y de redondez y esfericidad.

El objetivo principal de la instalación de este laboratorio es insertarse en el mercado petrolero y específicamente a la actividad no convencional, apuntando a brindar servicios de tipo geológicos que ayuden al control de calidad de las materias primas involucradas, evitando así posibles costos innecesarios como consecuencia de la recepción de materiales inadecuados para la actividad.

5.2 Ubicación

El lugar elegido para la ubicación del proyecto es la localidad de Bahía Blanca, situada al sur de la Provincia de Buenos Aires. La misma se ha convertido en un nodo sumamente importante en la logística asociada a la actividad de Vaca Muerta. El rol del puerto de dicha ciudad va cobrando cada vez más relevancia al recibir importaciones para Vaca Muerta, no sólo de equipos sino de materias primas varias, principalmente de arenas para la fracturación.

Ante la inminente evaluación de alternativas de transporte que abaraten los costos vía terrestre, Bahía Blanca queda indefectiblemente involucrada, ya sea por el tren Nordpatagónico previamente mencionado que permita una mejor conexión con la provincia de Neuquén, o por la posible llegada de buques con cargamentos de arenas nacionales. Sobre esto último, posiblemente las arenas de Dolavon podrían ser enviadas en buques desde el puerto de la localidad de Madryn, mientras que desde Entre Ríos, también se evalúa despachar buques de 40.000 a 50.000t desde el puerto de Ibicuy, hasta los muelles bahienses.

Asimismo cabe destacar que ya existe en la localidad infraestructura y servicios relacionados al mercado de Vaca Muerta. Un ejemplo lo constituye la empresa Halliburton, quien en 2017 ha inaugurado en la ciudad una de las plantas de procesamiento de baritina más grande y avanzada del país.

Cualquiera sea el caso, la localidad de Bahía Blanca será un punto clave en la recepción de la materia prima y como uno de los principales puntos proveedores de servicios para la actividad de Vaca Muerta, por lo que se considera estratégico el desarrollo de un laboratorio con capacidades de evaluación y determinación de la calidad de las arenas silíceas.

5.3 Servicios

El laboratorio a instalar apunta principalmente a la prestación de servicios de índole geológico que permitan controlar las características y calidad de las arenas silíceas que se reciben en la zona, para su posterior redistribución a los pozos petroleros. Para ello se realizarán ensayos o análisis básicos sobre las especificaciones técnicas de las arenas y determinar si las mismas se corresponden con lo exigido por la industria petrolera.

A continuación, se detallan los principales servicios a prestar:

- a) *Toma y preparación de muestras:* toma de muestras *in situ*, según lo recomendado por las ISO y PR API. Lavado, secado, reducción de tamaño y cuarteo hasta obtener el volumen de muestra apropiada y homogéneo. Atrición, deslamado y separación magnética.
- b) *Clasificación de muestras por tamices y análisis granulométrico:* secado de muestras, cuarteo y reducción de muestra. Separación y clasificación granulométrica de muestras mediante tamizado a diferentes mallas; peso del material obtenido para cada fracción granulométrica. Cálculo de % (porcentaje) en peso; realización de la curva granulométrica; informe.
- c) *Índice de redondez y esfericidad:* análisis de redondez y esfericidad de las partículas e informe.
- d) *Determinación de densidades:* determinación de densidades relativas y aparente; determinación de densidad real con picnómetro gaseoso.
- e) *Ensayos de turbidez.*
- f) *Análisis de solubilidad al ácido.*

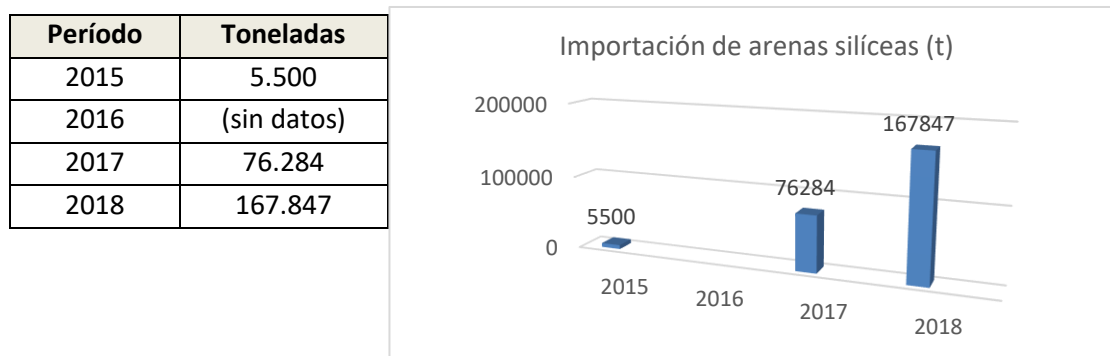
En lo que respecta a la resistencia a la rotura, dado el costo elevado de los equipos no se contará con el mismo al menos en la etapa inicial del proyecto. Se evaluará terciarizar el servicio en una primera instancia y luego se analizará de realizar una inversión para la compra del mismo a futuro.

5.4 Mercado para la prestación de servicios

Según la logística de las arenas silíceas en la actualidad, el principal mercado al que se pretende ofrecer los servicios es al de las arenas silíceas importadas que arriban al puerto local (Fig. 37) y que continuarán su rumbo por vía terrestre hasta los pozos petroleros perforados actualmente en la Formación Vaca Muerta. Queda abierta la posibilidad de ofrecer servicios a otros mercados si a futuro existen avances en perforaciones no convencionales en otras formaciones.

Según datos del Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca, los volúmenes recibidos de arenas silíceas importadas son los siguientes:

Tabla 25. Toneladas de arenas silíceas importadas que arribaron al Puerto de Bahía Blanca. Fuente: Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca (<https://www.puertobahiablanca.com/>).



Esta misma fuente, contabiliza la entrada de 66.858t de arenas silíceas importadas hasta el mes de mayo de 2019 (<https://www.puertobahia blanca.com/>).

A estos volúmenes de materia prima podrían llegar a sumarse a futuro los lotes de arenas de las canteras de Chubut y/o Entre Ríos, en caso de que finalmente se opte por el transporte marítimo hasta Bahía Blanca, para luego ser enviados en el tren Nordpatagónico (Fig. 38 y 39) hasta su locación final.

Cabe destacar que, si bien el objetivo principal será la industria petrolera, el laboratorio de servicios geológicos también contemplará la realización de análisis en materiales con aplicación en otras industrias, por ejemplo, para la realización de obras civiles.

La ubicación de un laboratorio en esta ciudad resulta estratégica para la industria. De la investigación realizada se obtuvo conocimiento de que son escasos los laboratorios encargados de brindar estos servicios a la industria petrolera. Además, los principales laboratorios consultados se encuentran ubicados en universidades de las localidades de San Juan y Mendoza, o en Buenos Aires (CETMIC, SEGEMAR), por lo que se encuentran alejados de la zona de influencia de dicha industria. Los ensayos suelen realizarse en general, en las canteras, en las mismas plantas de procesamiento de arenas y en algunos casos, en etapas posteriores por las operadoras petroleras, con el material ya acopiado y mezclado en sus plantas de almacenamiento o en la propia locación. Es decir, que durante las diversas etapas de carga, descarga, transporte y/o almacenamiento suele perderse la trazabilidad de los lotes y el correspondiente control de calidad.

5.5 Viabilidad

Tomando en cuenta las oportunidades que se presentan en Bahía Blanca, dados los grandes volúmenes de arenas silíceas que se reciben en la localidad, se procede a la evaluación del proyecto de instalación de un laboratorio de servicios geológicos.

a) Justificación del proyecto:

Una de las principales justificaciones para la puesta en marcha del proyecto se encuentra relacionada a la ubicación física del mismo. El criterio con el que fue definida la localización se encuentra fuertemente relacionada con la proximidad al puerto en donde se recibe el mayor volumen de arenas importadas del país, así como también otros insumos y equipamientos para la industria hidrocarburífera. Bahía Blanca es una localidad de fácil acceso, siendo nodo de muchas de las vías terrestres principales del centro – sur del país.

La zona resulta además estratégica a futuro si se culminan las obras relacionadas con el tren Nordpatagónico a Vaca Muerta o si llegaran a arribar cargamentos nacionales a través del mismo.

Otro de los puntos importantes es que, por las características ya mencionadas, la localidad ya es zona de influencia de Vaca Muerta, por lo que cuenta con parte de la logística y otros servicios adicionales en funcionamiento.

Desde el punto de vista económico, el proyecto implica un costo de inversión y riesgo relativamente bajo en comparación con la posiblemente alta rentabilidad que podría tener, dado principalmente por los grandes volúmenes de materia prima en circulación en la zona que podrían llegar a requerir de sus servicios. Estas características se detallarán más adelante durante la evaluación de la inversión y la vida útil del proyecto.

Finalmente, desde un punto de vista socio-económico, se estaría brindando un servicio de calidad para un mercado emergente y de gran importancia para la economía nacional.

b) Inversión requerida:

Los costos requeridos para la puesta en marcha de un laboratorio de esta índole se presentan a continuación. Incluye de valores promedio que existen en el mercado tanto para el equipamiento requerido, así como los costos de alquiler, servicios y contratación de mano de obra.

Teniendo en cuenta los tipos de ensayos a realizar, los costos promedio de equipamientos necesarios serían los siguientes:

Equipamiento	Rango de precios (USD\$)
Vibrador de tamices tipo Ro-Tap	2.262-2.835
Tamiz ASTM N°3.5 (5660mic)	190
Tamiz ASTM N° 4 (4750mic)	190
Tamiz ASTM N° 10 (2000mic)	190
Tamiz ASTM N° 18 (1000mic)	190
Tamiz ASTM N° 35 (500mic)	190
Tamiz ASTM N° 60 (250mic)	190
Tamiz ASTM N° 120 (125mic)	190
Tamiz ASTM N° 230 (63mic)	267
Juego completo de tamices ASTM completo + fondo y tapa	1.500
Balanza electrónica de 2000g x 0.1g de precisión	200
Balanza electrónica de 2000g x 0.01g de precisión	420-680
Balanza electrónica de 200g x 0.001g de precisión	810
Cuarateadores fijos	312 -325
Cuarateadores ajustables	820
Picnómetros	20-30
Agitador magnético	715
Turbidímetro	1.000
Vasos de precipitado 1000 a 2000ml	11-23
Probeta plástica	31
Probeta de vidrio graduada 100cc	49
Hornos de secado	670-1.980
Lupa binocular 10X	1500
Total aproximado:	15.000

Por lo tanto, como costo inicial únicamente en equipamiento, debería contemplarse una inversión del orden de los USD\$15.000, sin tener en cuenta los costos de IVA (21%), el cual elevaría la inversión a los USD\$18.150. Considerando la cotización del dólar a un valor de \$65, la suma total de gastos en equipamiento es de casi \$1.200.000.

Además de los equipos se deberá contemplar la contratación de empleados e impuestos y aportes relacionados. La mano de obra implicará el trabajo de un geólogo, que en este caso llevaría adelante el proyecto, y la contratación de un técnico de laboratorio.

Así mismo deberá pensarse en un lugar físico donde emplazar el proyecto, con una inversión inicial relacionada con trabajos de remodelación del lugar para una adecuada instalación del laboratorio. También se tendrá en cuenta los gastos fijos mensuales relacionados con el de alquiler del local, lo cual podría rondar entre \$20.000 y \$30.000, y los servicios ordinarios de agua, electricidad y gas, más impuestos municipales y provinciales, en el orden de los \$10.000.

Teniendo en cuenta todos estos ítems mencionados, los costos de inversión inicial calculados alcanzan la suma de \$1.700.000 y el detalle de los mismos se detalla a continuación en la siguiente tabla:

Inversión inicial		
ITEM	\$	US\$=65
Equipamientos		15.000
Remodelaciones del Laboratorio	600.000	
Seguridad (detectores humo / salidas y luces emergencia)	20.000	
Extintores	20.000	
Campana extracción de gases (con extractor) 1x1m	85.000	
TOTAL	1.700.000	

Cabe destacar que en el cálculo de inversión inicial deberá sumarse un monto relacionado con las certificaciones y habilitaciones del laboratorio por parte de diferentes organismos reguladores, así como también habilitaciones municipales y provinciales. Los valores de los mismos no ha podido ser cotizado por lo que no se incluye en este trabajo.

Finalmente, además de la inversión inicial, se detallan en la siguiente tabla los costos que involucrará el proyecto en concepto de gastos fijos mensuales:

Egresos mensuales (gastos fijos)	\$
Impuestos (agua, luz, gas, municipal y provincial)	10.000
Cargas sociales	105.000
Alquiler	30.000
Seguro	3.000
TOTAL	148.000

c) Tiempo de recuperación de la inversión:

Para evaluar en forma más aproximada el tiempo de recuperación de la inversión, se tendrá en cuenta los costos de la preparación y análisis de muestras. Para ello se presentan a continuación un promedio de precios orientativos, según lo cotizado en el mercado para mediados del año 2019.

Ensayo/Análisis	Precio (\$) por muestra
Preparación de muestra y determinación del rendimiento: lavado, atrición, deslamado y separación magnética	4800
Clasificación por tamices	1100
Análisis granulométrico en seco	1200
Índice de esfericidad y redondez	4400
Densidad relativa y aparente	1000
Densidad real con picnómetro gaseoso	1000
Ensayo de turbidez	1700
Determinación de solubilidad en ácido	2400
Ensayo de resistencia a la compresión orientativo y determinación del K máximo establecido por Norma	5200
Total por muestra:	22800

A partir de las cotizaciones solicitadas se desprende que el costo total por muestra ensayada puede variar entre \$23.000 y \$46.000. La diferencia de costos dependerá de la cantidad de fracciones granulométricas que se obtengan luego del proceso de tamizado.

Considerando el costo por muestra más conservador, puede evaluarse que se requerirá procesar al menos unas 43 muestras para recuperar la inversión inicial realizada únicamente en equipamiento. A su vez se estima que se necesitará procesar al menos 7 muestras por mes para cubrir los gastos fijos relacionados con el alquiler, impuestos y empleados.

Por su parte, el tiempo de recuperación de la inversión propiamente dicha se verá fuertemente condicionado por los volúmenes de materias primas que ingresen al puerto local y por la posibilidad de inserción que pueda lograrse en ese mercado. Teniendo en cuenta el promedio anual de material ingresado al puerto de Bahía Blanca durante los dos últimos años versus la cantidad de muestras a tomar dentro de un lote según lo

establecido por los estándares y prácticas recomendadas, se desprende el siguiente análisis:

El promedio de arenas síliceas ingresadas entre los años 2017 y 2018 al puerto de Bahía Blanca es de 122.065Tn (Tabla 27). Siendo criteriosos y muy conservadores, se considerará apuntar a tan solo un 1% de ese volumen total, es decir alrededor 1.200Tn de materias primas. Las prácticas recomiendan la toma de una muestra cada 9Tn, por lo que la cantidad total a obtener para dicho volumen rondaría las 135 muestras anuales, es decir, un promedio de 11 muestras mensuales.

Teniendo en cuenta estos parámetros y considerando una toma de 15 muestras por mes, se calcula un plazo de alrededor de 6 meses para recuperar la inversión inicial y cubrir al mismo tiempo los gastos fijos involucrados. Si se incluye los costos de certificaciones y habilitaciones no cotizadas, el tiempo de recuperación de la inversión podría ascender de 11 meses a 1 año.

Inversión inicial	\$1.700.000
Egresos mensuales	\$148.000
Ingresos mensuales	\$
Cantidad de muestras mensuales	15
Precio de ensayos por muestras	23.000
TOTAL	345.000
Actualización de precios anuales	1.4%
Meses para recuperar la inversión	5.40

Otros de los parámetros que se tuvieron en cuenta para la evaluación de la viabilidad del proyecto fueron el VAN (Valor Actual Neto) y TIR (Tasa de Interés de Retorno). Se evaluaron los flujos de caja y la inversión aplicando tasas de descuentos, incluyendo así los efectos de los distintos plazos y riesgos relativos.

Dado que para el sector minero la tasa de descuento de VAN ronda los 8-10% y la tasa umbral TIR es mayor al 15%, para este proyecto en particular se decidió utilizar un umbral de 10% para el VAN y 15% para TIR. El balance entre ingresos y egresos considerados a lo largo del tiempo se detalla en el Anexo 2. Los resultados obtenidos mediante el cálculo de VAN y TIR fueron los siguientes:

VAN	\$ 969,570.01
TIR	16%

Como el **Valor Actual Neto** considera las inversiones iniciales, los distintos momentos de entrada y salida de los fondos en efectivo y los diferentes niveles de riesgo, un resultado positivo como es en este caso, determina que se trata de una buena inversión.

d) Vida útil del proyecto:

La vida útil del proyecto se verá fuertemente ligada a la explotación de la Formación Vaca Muerta y eventualmente, a la posible explotación de nuevos yacimientos no convencionales que puedan surgir a futuro.

Hasta el momento y de acuerdo a las características actuales del mercado y la producción de hidrocarburos no convencionales, varios autores coinciden en que Vaca Muerta podría explotarse y autoabastecer al país por un período de 50 años. En tanto y en cuanto estas condiciones se mantengan, el laboratorio de ensayos de índole geológico continuará siendo útil para la prestación de servicios de control de calidad de las materias primas involucradas en las operaciones. Finalmente, se considera la posibilidad de incorporación de otros servicios geológicos que sean requeridos en la región por este u otros mercados emergentes y que no sean brindados por otros laboratorios de la zona.

5.6 Otras consideraciones y recomendaciones

5.6.1 Certificaciones, acreditaciones y habilitaciones

Como el proyecto pretende insertarse en el mercado actualmente en auge de Vaca Muerta y ser competitivo, sería recomendable que el laboratorio sea certificado por la norma **ISO 17025**. La misma se emplea para habilitar laboratorios de ensayos y calibraciones, asegurando un sistema de gestión acreditado capaz de proveer servicios con competencia técnica, de calidad y con veracidad en sus resultados.

La norma ISO 17025 se basa en la ISO 9000, se acredita mediante ensayos e incluye ciertos requisitos técnicos específicos. La acreditación de los laboratorios es realizada a través de entes regionales que responden a redes internacionales de colaboración. Dicha acreditación, conlleva un proceso de consultoría a cargo de personal idóneo en la ISO 17025, que pueda indicar las falencias y fortalezas del laboratorio en cuestión, a fin de aprobar correctamente la auditoría. Se deberá auditar tanto al laboratorio, como a sus análisis y procedimientos. Finalmente, el proceso involucra una fase de certificación ante un ente competente, que debe ser renovada anualmente.

Los requisitos mínimos para la habilitación de laboratorios industriales en la Argentina, se encuentran establecidos por la resolución 504/01. Se exige que los mismos se encuentren acreditados por el Organismo Argentino de Acreditación (OAA), según los lineamientos de la Norma IRAM 301 "Requisitos generales de los Laboratorios de Ensayo y Calibración", o acreditar ante una Autoridad de Aplicación que posea un sistema de calidad equivalente a dicha norma.

El Organismo Argentino de Acreditaciones (**OAA**), es una entidad civil sin fines de lucro que fue creada dentro del marco del Sistema Nacional de Normas, Calidad y Certificación. La acreditación por parte de este organismo logra un reconocimiento formal de la competencia e imparcialidad de los laboratorios, proveedores de ensayos de aptitud, productores de materiales de referencia, organismos de certificación y/o de inspección. Incluye un proceso de evaluación documental inicial, una evaluación in situ posterior y ante cualquier no conformidad hallada, la entidad deberá responder satisfactoriamente.

Como se trata de evaluaciones independientes basadas en requisitos normativos internacionales, permite demostrar que las entidades son confiables para realizar ensayos, análisis, programas de ensayos de aptitud, producción de materiales de referencia, calibraciones, inspecciones y certificaciones.

Otros requisitos establecidos por la resolución 504/01, consiste en emplear métodos de muestreo y análisis de acuerdo con las normas USEPA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20 th Edition*, NIOSH, OSHA y ASTM. A su vez, deberá contar con equipamiento, estándares de calibración y personal acordes a la calidad y requisitos exigidos por las normas mencionadas. Si alguno de los parámetros no estuviese contemplado en los citados métodos, el Laboratorio solicitante deberá presentar la metodología propuesta con los antecedentes correspondientes, para ser posteriormente evaluada y aprobada. Así mismo, deberá cumplir estrictamente con las normas vigentes de seguridad e higiene relativas a las personas, bienes y el medio ambiente.

Otra de las entidades que podría considerarse, es el Consejo de Fiscalización de Laboratorios de la República Argentina (**COFILAB**), creado con el propósito de establecer un sistema de control uniforme para los laboratorios de análisis y ensayos. Uno de los servicios brindados por este organismo consiste en el Plan Nacional de Fiscalización de Laboratorios, donde los laboratorios pueden participar en forma voluntaria. Se trata de una serie de normas, requisitos, derechos y obligaciones a cumplir que permitirá establecer y certificar la competencia del laboratorio.

Finalmente, en lo relacionado al aspecto medio ambiental, todo residuo que se genere en la actividad del laboratorio (efluentes, ácidos, material particulado, entre otros) se dispondrá cumpliendo las normativas de la **OPDS** (Organismo Provincial para el Desarrollo Sustentable). Se trata de la autoridad de aplicación de las normativas ambientales en la Provincia de Buenos Aires, encargado de planificar, coordinar y fiscalizar las políticas ambientales de la provincia, gestionando diversos programas cuyos objetivos son mantener y restaurar los servicios ecosistémicos esenciales que aseguren la reproducción y preservación de los ambientes naturales y el derecho a un ambiente sano para todos.

5.6.2 Higiene y seguridad en el ambiente laboral

Previo a la puesta en marcha del proyecto se deberá realizar una apropiada identificación de peligros y análisis de riesgos involucrados en las actividades que se llevarán a cabo. Se deberán determinar los elementos de protección personal a implementar en cada tarea o ensayo a realizar (protección respiratoria, guantes, gafas, ropa, etc.). Se evaluará la

posible generación de material particulado y gases nocivos, así como su posible mitigación mediante el uso de campanas de extracción. Se deberá contar con las hojas de seguridad (MSDS) de los distintos productos químicos a utilizar para una adecuada manipulación. Así mismo, deberá considerarse los procedimientos para una adecuada gestión de residuos y manejo de posibles sustancias peligrosas.

Otro tema de suma relevancia a tener en cuenta para la puesta en marcha del proyecto es la aplicación de procesos y conductas, por parte del laboratorio y el personal avocado, que se comprometan a las normativas y buenas prácticas de higiene y seguridad en el ambiente laboral, reguladas en nuestro país por la Ley Nacional Nro. 19.587 de higiene y seguridad en el trabajo.

La mencionada legislación, comprende normas técnicas y medidas sanitarias, con el fin de proteger la vida del trabajador, realizando la mitigación, eliminación o aislamiento de los riesgos laborales, mediante el uso de herramientas como los análisis de riesgo y trabajo seguro (ARTS), reuniones de seguridad previas a la labor, el uso de barreras de mitigación y contención de riesgos, la implementación del uso de elementos de protección personal específicos (EPP), entre otros.

Estipula la implementación de reglamentación de Salud, Seguridad y Medioambiente (HSE, por sus siglas en inglés), que comprenda recomendaciones, correcciones y técnicas de prevención de accidentes y riesgos en el ambiente laboral. Así mismo indica que el entorno laboral, debe poseer un diseño tal que, genere un ambiente propicio y seguro para llevar a cabo las tareas del trabajador, incluyendo factores físicos como espacio, ventilación, calefacción, iluminación, insonorización, etc.

Esta Ley comprende además la implementación de un sistema de deposición final de todo tipo de residuos y efluentes, en concordancia con las normativas vigentes.

5.7 Discusión

En el presente trabajo, se evaluó la creciente importancia de las arenas silíceas como mineral de aplicación en la industria petrolera, sus ventajas y desventajas en relación a sus propiedades físico-químicas y a su disponibilidad en el mercado. Hemos entendido el rol crítico que juega en el antes y durante los procesos de fracturación hidráulica, pero también hemos comprendido que el papel continúa por largos períodos de tiempo luego de finalizada la operación propiamente dicha.

Una vez que el pozo es puesto en producción, el mismo esfuerzo de cierre o compresión que sufren las fracturas dentro de la formación, es transmitido al agente de sostén, en este caso las arenas. Si el tipo de agente no es elegido correctamente, podría sufrir un aplastamiento y liberación de partículas finas que reducirían dramáticamente la permeabilidad y, consecuentemente, la conductividad del sondaje.

En la industria existe una tendencia a la selección de arenas de granulometrías finas, ya que son más fáciles de bombear a caudales menores, pueden ser desplazadas a mayores profundidades y su asentamiento en la fractura es más lento respecto a los agentes de sostén de mayor tamaño. Sin embargo, la movilización de grandes volúmenes de partículas de

granulometrías pequeñas provoca serios problemas de suciedad en la operación, como consecuencia de su fracturación y generación de material fino.

Todos estos son ejemplos de la relevancia de realizar análisis meticulosos sobre la calidad de la materia prima que va a emplearse en una operación de tan elevados costos. El correcto análisis de las propiedades físicas y químicas del insumo a emplear es fundamental, ya que condicionará el éxito de la operación de fracturación y la consecuente productividad del pozo. El establecimiento de un laboratorio capacitado y certificado para tal fin podría resultar de gran ayuda a la hora de reducir costos operacionales como consecuencia del consumo de materias primas de mala o inapropiada calidad. Así mismo, la ubicación de un laboratorio de servicios geológicos en uno de los nodos más importantes con los que cuenta la actividad relacionada a Vaca Muerta resulta estratégico.

Como ya ha sido mencionado, la mayoría de los ensayos se realizan en la etapa de extracción y procesamiento de las arenas, por parte del proveedor, y luego, por la operadora petrolera que le dará aplicación en la locación final. Entre medio, las materias primas pasan por numerosas etapas de transporte, almacenamiento y redistribución, muchas veces en plantas de acopio donde son mezcladas con materiales provenientes de diferentes proveedores. Por este motivo, la ubicación en la localidad de Bahía Blanca continúa siendo estratégica ya que actúa como punto intermedio para el control de calidad y trazabilidad de los lotes, entre su origen en las canteras y su aplicación final en los pozos a fracturar. Por el momento resulta clave en la recepción de las materias primas importadas que acceden a través del puerto local, pero a futuro continuará siendo estratégico si se decide enviar también vía fluvial-marítima las arenas de origen nacional y su posterior trasvaso en ferrocarril.

A nivel proyecto, la instalación de un laboratorio de estas características podría ser clave o estratégico para brindar servicios a un mercado actualmente en auge y con cada vez mayor posibilidad de crecimiento. Sin dudas el éxito del proyecto se verá fuertemente influenciado por las posibilidades de inserción que se logre en el mercado de las arenas silíceas para la fracturación hidráulica, sin embargo, la viabilidad del mismo parece actualmente alentadora. La viabilidad no solo sería justificada por los costos relativamente bajos de inversión para su puesta en marcha, sino también por los volúmenes crecientes de materia prima que se emplean en la actualidad y por la proyección a futuro que se les da a las explotaciones no convencionales en el país.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alric, V. 2015. Arenas silíceas: otra visión acerca del cuarzo y su tratamiento legal como recurso mineral de valor estratégico. Colegio Profesional de Geólogos del Chubut. <http://www.colegiogeologosch.com.ar/index.php/arenas-siliceas-por-geol-viviana-alric>
- AMP 2017. Las arenas en la fracturación hidráulica. Caso de estudio. Advanced Mineral Processing S.L. España. http://www.ampmineral.com/advanced-mineral-processing_SL.php
- ANSI (American National Standards Institute). Estados Unidos. <https://www.ansi.org/>
- API (American Petroleum Institute). Estados Unidos. <https://www.api.org/>
- Arenas Argentinas del Paraná. Arenas de sílice, Entre Ríos. <https://www.arenasargentinas.com.ar/es>
- ARESIL -Arenas Industriales. Entre Ríos. <http://aresil.com.ar/>
- Braga, P.F.A., Lima, F. M., Coelho, J.M., Gonçalves, C. 2017. Areia de Fraturamento Hidráulico: usos, características, mercado e perspectivas. Série Rochas e Minerais Industriais. Centro de Tecnología Mineral (CETEM). Brasil.
- Bustamante, P. 2018. Infraestructura in situ: un centro de almacenaje y logística integral de agentes de sostén. Trabajo técnico. Petrotecnia: Los No Convencionales, hacia el desarrollo extendido - Revista del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG). Año LIX N°1: 26-35.
- Caminos, R. 1999. Geología Argentina: El Jurásico y Cretácico de la Cordillera Principal y la Cuenca Neuquina. Subsecretaría de Minería de la Nación – SEGEMAR. Anales 29: 399-432. Buenos Aires
- Castro, L. N. 2016. Mercado. Apuntes de clase - Carrera de Especialización en Geología Minera. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Catalano, E.F. 1999. Código de Minería Comentado. Ed. Zavalia, Buenos Aires.
- Ciullo, P.A. 1996. Industrial Minerals and Their Uses: a handbook and formulary. Noyes Publications, Westwood, New Jersey - USA.
- Consejo de Fiscalización de Laboratorios República Argentina. <http://www.cofilab.org.ar/>
- Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca. <https://www.puertobahia blanca.com/>
- CRISTAMINE. Entre Ríos. <http://www.cristamine.com/>
- Dirección General de Desarrollo Minero 2012. Perfil de mercado del sílice. Coordinación General de Minería, Secretaría de Economía. Estados Unidos Mexicanos. https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/mineria_estadisticas_300513/estadisticas_perfiles_silice_0513.pdf
- Dirección General de Desarrollo Minero 2017. Perfil de mercado del sílice. Subsecretaría de Minería, Secretaría de Economía. Estados Unidos Mexicanos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287808/Perfil_Silice_2017.pdf
- Diario Jornada 2018. Las arenas silíceas de Dolavon podrían salir desde Madryn. Publicación 25 de Agosto de 2018. Diario Jornada en la Patagonia. https://www.diariojornada.com.ar/218552/provincia/las_arenas_siliceas_de_dolavon_podrian_salir_desde_madryn/
- d'Huteau, E, 2012- Características del agente de sostén utilizado en reservorios no convencionales. Petrotecnia, Revista del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Agosto 2012: 67-69.
- El Cronista 2019. Vaca Muerta: transfieren predio clave para la reactivación del Tren Nordpatagónico. Publicación del 24 de Julio de 2019, Diario El Cronista.

<https://www.cronista.com/economiapolitica/Vaca-Muerta-transfieren-predio-clave-para-la-reactivacion-del-Tren-Norpatagonico-20190724-0001.html>

El Diario 2018. YPF prevé sacar arenas silíceas desde el puerto de Madryn. Publicación del 23 de Agosto de 2018, El Diario, Madryn-Trelew-Rawson-Comodoro Rivadavia.

<https://www.eldiariodemadryn.com/2018/08/ypf-preve-sacar-arenas-siliceas-desde-el-puerto-de-madryn/>

El Diario 2019. Proveerá arena al grupo Techint la firma belga que opera en Diamante. Publicación 12 de Febrero de 2019. El Diario, Paraná, Entre Ríos. <https://www.eldiario.com.ar>

Ferrer Deheza, T. y Montamat, G. 2012. Estudio de prefactibilidad del desarrollo del mercado de proppant en la Argentina. Proyecto final de Ingeniería Industrial. Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA).

Gandini, N. 2018. Litigio provincial: El conflicto de YPF con empresarios mineros por la arena de Vaca Muerta. Publicación 10 de Abril de 2018. Diario digital ECONO JOURNAL – Economía, Energía y Minería. Buenos Aires. <https://econojournal.com.ar/2018/04/el-conflicto-de-ypf-con-empresarios-mineros-por-la-arena-de-vaca-muerta/>

Giglio, M. 2018. Actualidad de los agentes de sostén. Trabajo técnico. Petrotecnia: Los No Convencionales, hacia el desarrollo extendido - Revista del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG). Año LIX N°1: 26-35.

Gobierno de Entre Ríos 2012. Registro de productores mineros de Entre Ríos. <http://www.entrerios.gov.ar/minpro/userfiles/files/mineria/REGISTRO.pdf>

Godeas, M., Segal, S. y Herrmann, C.J. 2008. Inventario Minero de la Provincia de Jujuy. Geología y Recurso Naturales de la Provincia de Jujuy, Relatorio XVII Congreso Geológico Argentino: 493-518. Jujuy.

Gozalvez, M.R., Herrmann, C.J. y Zappettini, E.O. 2004. Minerales industriales de la República Argentina. Secretaría de Minería de la Nación, IGRM, SEGEMAR. Anales N°39: 13-82. Buenos Aires.

Grupo Arenas Patagónicas. Chubut. <http://arenaspatagonicas.com.ar/>

Herrmann, C.J. 2008. Minerales y rocas industriales de la Provincia de Jujuy. Geología y Recurso Naturales de la Provincia de Jujuy, Relatorio XVII Congreso Geológico Argentino: 519-534. Jujuy.

Hughes, G. 2019. Planta de procesamiento de arenas silíceas. Conferencia abierta dictada el 8 de Marzo de 2019. AAPG – UNS Student Chapter; Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.

Kaufman, P.B., Bannon, H.D., Anderson, R.W., Ziegler, M., Neves, A.R., Parker, A.A., Abney, K., Kerr de Parva Crtes, G.W., Joyce, S. y Penny, G.S. (2007). Introducing New API/ISO Procedures for Proppant Testing. Society of Petroleum Engineer Annual Technical Conference and Exhibition. SPE N° 110697. California - USA.

Laboratorio de Análisis Industriales. Resolución N° 201/02. Modificación de art. 5 de la Resolución 504/01, La Plata, 20 de Diciembre de 2000.

Larcher, N., Cabrera, R. y Chayle, W. 2008. Inventario Minero de la Provincia de Jujuy: Cuadro resumen de Indicios y Ocurrencias Minerales de la Provincia de Jujuy. SEGEMAR, Secretaría de Minería e Hidrocarburos – Ministerio de Desarrollo Económico y Producción, Gobierno de Jujuy. http://www.mineriajujuy.gob.ar/site/inventario_minero.php

Ley Nro. 19.587. Ley de higiene y seguridad en el trabajo. Información Legislativa, Ministerio de Justicia y Derechos Humanos, Presidencia de la Nación. <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/15000-19999/17612/norma.htm>

Losa, G. y Pruscino, A. 2016. Manejo de agente de sostén en la explotación de no convencionales en la Cuenca Neuquina. Trabajo final de posgrado PPG. Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA).

Masarik, G. 2018. El No Convencional, listo para pasar al desarrollo masivo. Petrotecnia: Los No Convencionales, hacia el desarrollo extendido - Revista del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG). Año LIX N°1: 10-12.

Ministerio de Energía y Minería 2017. Panorama de mercado de rocas y minerales industriales: CUARZO. Año 1 - N°1 – 2017. Ministerio de Energía y Minería, Presidencia de la Nación: Dirección de Asistencia al Productor Minero, Dirección Nacional de Promoción Minera, Subsecretaría de Desarrollo Minero, Secretaría de Minería.

Organismo Argentino de Acreditación. <https://www.oaa.org.ar/>

Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible. <http://www.opds.gba.gov.ar/>

Panorama Minero 2008. Geografía de los Minerales Industriales de la República Argentina: Arenas silíceas. Suplemento Especial (341), Capítulo III. <http://segemar-intemin-biblioteca.blogspot.com/>

Peñaranda, V.F. 2014. Arenas, más allá del acatamiento de las normas. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Petrotecnia - Revista del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG). Junio 2014: 66-81.

Pettijohn, F.J., Potter, P. y Siever, R. 1987. Sand and Sandstone (2da. Edición). Springer-Verlag, 618 p., Berlín.

Ponce, J.J., Montagna, A.O. y Carmona, N. 2015. Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros. Fundación YPF & Universidad Nacional de Río Negro.

Ramírez R., C. 2007. Minerales industriales: su importancia económica. Academia de Ingeniería de México - Especialidad: Geología, México D.F. 36 pp

Revista Petroquímica 2019. Con un nuevo proceso, revolucionan la provisión de arenas para fractura de pozos. Publicación del 13 de Marzo de 2019. Revista Petroquímica: Petróleo, Gas, Química & Energía. <https://www.revistapetroquimica.com/con-un-nuevo-proceso-revolucionan-la-provision-de-arenas-para-fractura-de-pozos/>

Salgado Riquelme, K.A. (2017). Caracterización y análisis de distintas bandas granulométricas de la arena de Ramadillas para ser utilizada como material natural de soporte en la extracción no convencional de gas. Informe de Proyecto para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción.-Chile.

Servicio Geológico Minero Argentino. <http://www.segemar.gov.ar/>

SEGEMAR-UNSAM 1999. Seminario de estudios sobre el ciclo minerales – materiales: CUARZO. Publicación técnica N°4, Septiembre 1999. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Tecnología Minera, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Universidad Nacional de General San Martín.

Selley, R.C. 2000. Applied Sedimentology, 2nd ed. Academic Press, Royal School of Mines, Imperial College of Sciences, Technology and Medicine, London – UK.

Smith, M.R. y Collis, L. 2001. Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes, 3rd ed. Engineering Geology Special Publication No. 17, Geological Society, London - UK.

USGS 2019. Mineral Commodity Summaries 2018. US Geological Survey, US Department of the Interior. United States. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018>

Vaca Muerta News 2017. Halliburton inauguró en Bahía Blanca una planta de procesamiento de baritina para Vaca Muerta. Publicación del 28 de Abril de 2017. http://www.vacamuertanews.com.ar/ver_noticia.php?id=20170428183801

Villar, J.H. 2008. Facies orgánicas y formación de petróleo. Curso Pre-Congreso. XII Reunión argentina de sedimentología. Buenos Aires.

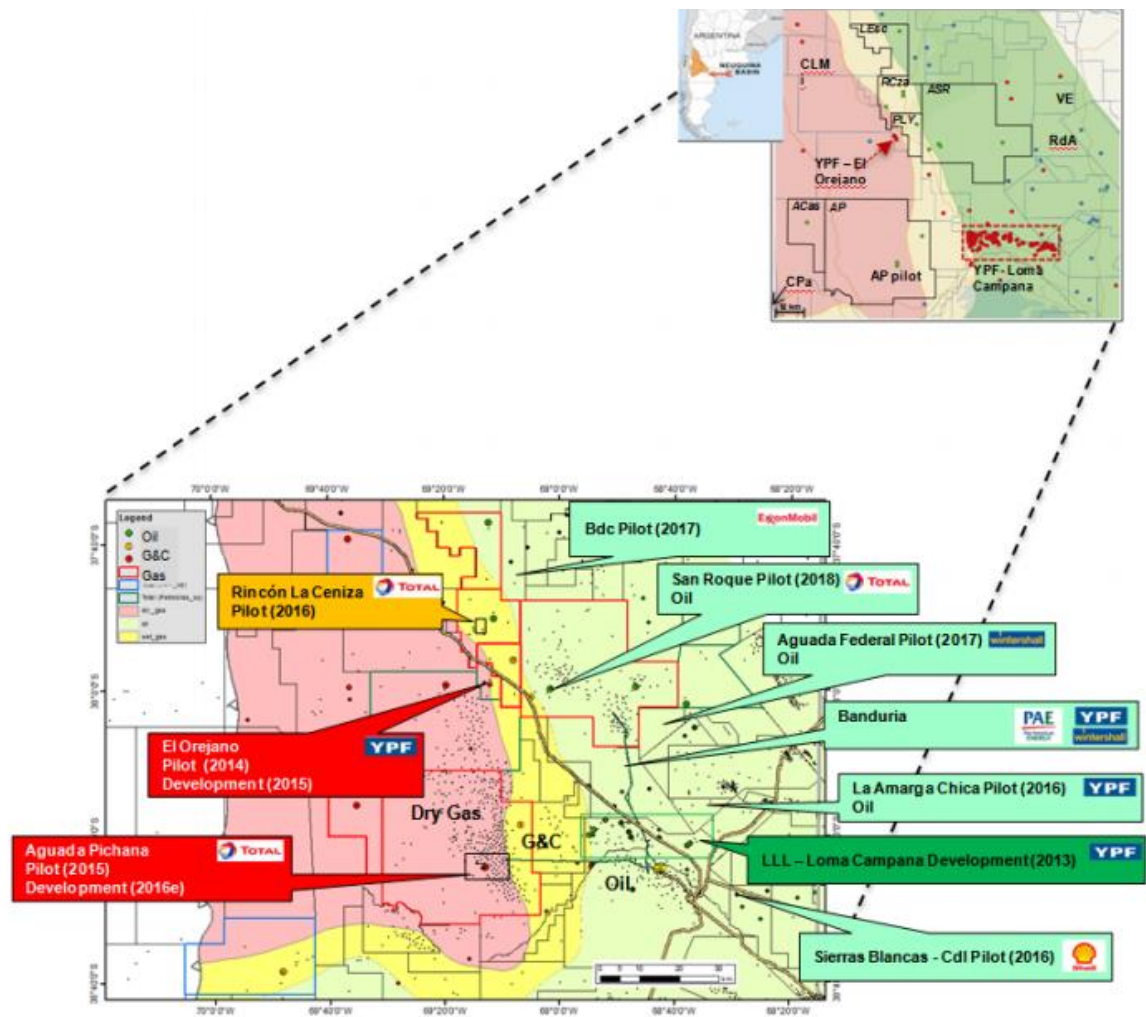
YPF. Recursos No Convencionales. Desafío Energético. <https://www.ypf.com>

YPF 2013. Camino al autoabastecimiento. EL desafío energético de la energía. Petróleo y gas no convencionales.

https://www.ypf.com/energiaypf/paginas/img/pdf/Camino_al_auto_abastecimiento.pdf

Yussen, A.I. 2015. Arenas silíceas: mi opinión acerca del cuarzo y su tratamiento legal como recurso mineral aprovechable. Colegio Profesional de Geólogos del Chubut. <http://www.colegiogeologosch.com.ar/index.php/arenas-siliceas>

Anexo 1. Principales bloques de la Cuenca Neuquina en etapa de desarrollo de la Formación Vaca Muerta y respectivas operadoras.



YPF	Loma Campana (Oil)
	El orejano (desarrollo - gas)
	Pilotos
Exxon/XTO	Bajo del Choique (Piloto – Oil)
Shell	Sierras Blancas/A.Mora (Pilotos – Oil)
Wintershall	Aguada Federal (Piloto – Oil)
Total	Aguada Pichana (Piloto – Gas Seco)
	Rincón La Ceniza (Piloto – Gas y condensado)
	Aguada Pichana (Desarrollo – Gas Seco)
	San Roque (Piloto - Oil)
Otros Operadores	Varios.

Fuente: Losa & Pruscino (2016).

Anexo 2. Balances empleados en el cálculo del VAN y TIR para la evaluación del proyecto, expresados en pesos Argentinos.

Meses	Ingresos	Egresos	Balance
1	345000	1700000	-1355000
2	345000	148000	197000
3	345000	148000	197000
4	345000	148000	197000
5	345000	148000	197000
6	345000	148000	197000
7	345000	148000	197000
8	345000	148000	197000
9	345000	148000	197000
10	345000	148000	197000
11	345000	148000	197000
12	345000	148000	197000
13	483000	207200	275800
14	483000	207200	275800
15	483000	207200	275800
16	483000	207200	275800
17	483000	207200	275800
18	483000	207200	275800
19	483000	207200	275800
20	483000	207200	275800
21	483000	207200	275800
22	483000	207200	275800
23	483000	207200	275800
24	483000	207200	275800
25	676200	290080	386120
26	676200	290080	386120
27	676200	290080	386120
28	676200	290080	386120
29	676200	290080	386120
30	676200	290080	386120
31	676200	290080	386120
32	676200	290080	386120
33	676200	290080	386120
34	676200	290080	386120
35	676200	290080	386120
36	676200	290080	386120
37	946680	406112	540568
38	946680	406112	540568
39	946680	406112	540568
40	946680	406112	540568

41	946680	406112	540568
42	946680	406112	540568
43	946680	406112	540568
44	946680	406112	540568
45	946680	406112	540568
46	946680	406112	540568
47	946680	406112	540568
48	946680	406112	540568
49	1325352	568556.8	756795.2
50	1325352	568556.8	756795.2
51	1325352	568556.8	756795.2
52	1325352	568556.8	756795.2
53	1325352	568556.8	756795.2
54	1325352	568556.8	756795.2
55	1325352	568556.8	756795.2
56	1325352	568556.8	756795.2
57	1325352	568556.8	756795.2
58	1325352	568556.8	756795.2
59	1325352	568556.8	756795.2
60	1325352	568556.8	756795.2